



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL-AGUA

REMOCIÓN DE MICROALGAS MEDIANTE  
ELECTROCOAGULACIÓN/FLOTACIÓN EN PROCESOS DE  
POTABILIZACIÓN

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:  
**MARCO ANTONIO RUMUALDO MORALES**

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. ALEJANDRA MARTÍN DOMÍNGUEZ  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

COMITÉ TUTOR  
M.I. MARÍA DE LOURDES RIVERA HUERTA  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

JIUTEPEC, MORELOS. MAYO 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dra. Ramírez Zamora Rosa María

Secretario: Dra. Orta Ledesma María Teresa

Vocal 1: Dra. Chávez Mejía Alma Concepción

Vocal 2: M. I. Rivera Huerta María De Lourdes

Vocal 3: Dra. Martín Domínguez Alejandra

Lugar donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Potabilización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el cual cuenta con Acreditación ante la entidad mexicana de acreditación, a.c., como Laboratorio de Ensayos bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-2018 (ISO/IEC 17025:2017) Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, rama Agua, Acreditación Número AG-177-032/09, vigente desde el 29 de abril de 2009; así como con Aprobación por parte de la Comisión Nacional del Agua, No. CNA-CGA-2425, con vigencia de 24 meses a partir del 10 de marzo de 2022.

### **TUTOR DE TESIS:**

Dra. Martín Domínguez Alejandra



---

**FIRMA**

## **DEDICATORIAS**

*A mis padres, Marco Antonio Rumualdo López y a Carmen Morales Dimayuga, porque su hermoso contraste me hizo conseguir un equilibrio en este camino; mis problemas se volvieron sus problemas; siempre con amor firme para mi. A Katia y Vale, que su amor, consejos y ánimos fueron indispensables; nos costó.*

*A todo aquel que ayudó a un niño que a todas luces sólo mostraba ilusión y ganas.*

*¡Gracias, lo logramos!*

*“He visto poco de ustedes. Las cosas han sido difíciles para los soñadores; no te aburras, esta es la era más emocionante en la que deseamos haber vivido y las cosas solo comienzan”*

*-La distancia entre los puntos*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Consejo nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el estímulo económico y por fomentar la pasión por la ciencia en los jóvenes.

Al instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por poner sus recursos a nuestra absoluta disposición.

A la Dra. Alejandra Martín Domínguez y a la M.I. María de Lourdes Rivera Huerta, por su guía desafiante y estimulante, por su empatía y disposición. Jamás olvidaré sus enseñanzas, me llevo parte de ustedes.

A la Dra. María Teresa Orta Ledesma, a la Dra. Alma Concepción Chávez Mejía y a la Dra. Rosa María Concepción Ramírez Zamora, por permitirse generar una breve pero significativa conexión conmigo a pesar del contexto. Gracias por su guía.

Al laboratorio de Potabilización, por involucrarse en este proyecto con gran solidaridad, comprensión y entusiasmo como si fuera propio. A Ernesto, Agustín, Chucho y Lili, gracias por hacerme sentir en un gran equipo.

A la subcoordinadora de Potabilización, la Dra. Jennifer Bañuelos, por proporcionarme gran parte de las herramientas necesarias para llevar a cabo esta investigación.

Al departamento de Limnología por sus oportunos y específicos consejos en el cultivo de microalgas.

A la Dra. Maricela Martínez Jiménez, por su inmediata simpatía y amabilidad; gracias por facilitarme gran parte del material necesario para realizar el cultivo de microalgas.

Al personal del laboratorio Enzo Levi, por permitirme utilizar sus instalaciones sin ninguna restricción. Al Ing. Alberto Castro Salazar, Antonio Moyaho Díaz y Ángel Moreno (Los Carnas), por recordarme que la disciplina y educación no está peleada con un ambiente de trabajo ameno y lleno de júbilo.

A mi generación: Edwin, Lucía, Néstor, Raúl, Nancy y Jaime; con ustedes entendí que la complicidad y solidaridad puede ser inmediata si tu corazón está dispuesto.

## ÍNDICE

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2 Antecedentes</b>	<b>8</b>
<b>3 Objetivos</b>	<b>16</b>
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos	16
<b>4 Hipótesis</b>	<b>16</b>
<b>5 Marco teórico</b>	<b>17</b>
<b>5.1 Microalgas</b>	<b>17</b>
5.1.1 Generalidades	17
5.1.2 Problemas que generan las microalgas	18
5.1.3 Clorofila-a	20
5.1.4 Índice de Carlson	21
5.1.5 Factores involucrados en la generación de un cultivo de microalgas	22
<b>5.2 Clarificación del agua</b>	<b>24</b>
5.2.1 Coagulación	24
5.2.2 Floculación	25
5.2.3 Flotación	27
<b>5.3 Electroquímica</b>	<b>28</b>
5.3.1 Principios de electricidad	28
5.3.2 Reacciones Redox	29
5.3.3 Celdas electrolíticas	30
5.3.4 Electroodos	30
5.3.5 Ley de Faraday	30
<b>5.4 Electrocoagulación</b>	<b>31</b>
<b>5.5 Electroflotación</b>	<b>32</b>
<b>5.6 Factores involucrados en el desempeño de un proceso de electrocoagulación/flotación</b>	<b>33</b>
5.6.1 Factores fisicoquímicos	33
5.6.2 Factores electroquímicos	35
5.6.3 Factores hidráulicos	36
<b>5.7 Costos en un proceso de electrocoagulación/flotación</b>	<b>39</b>

<b>5.8</b>	<b>Diseño de experimentos</b>	<b>40</b>
5.8.1	Definiciones básicas	40
5.8.2	Tipos de diseños de experimentos	41
5.8.3	Diseños factoriales 2 <sup>k</sup>	42
5.8.4	Ventajas de los diseños factoriales	43
5.8.5	Aleatorización	43
<b>6</b>	<b><i>Materiales y métodos</i></b>	<b>44</b>
<b>6.1</b>	<b>Descripción general</b>	<b>44</b>
<b>6.2</b>	<b>Técnicas analíticas</b>	<b>46</b>
6.2.1	Caracterización del agua	46
6.2.2	Métodos para la caracterización del agua	47
6.2.3	Cuantificación de clorofila-a y feofitina-a.	48
<b>7</b>	<b><i>Producción de microalgas</i></b>	<b>53</b>
<b>7.1</b>	<b>Tanques de cultivo</b>	<b>53</b>
<b>7.2</b>	<b>Curva de producción de clorofila-a</b>	<b>54</b>
<b>7.3</b>	<b>Resultados</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b><i>Planteamiento preliminar del diseño de experimentos</i></b>	<b>62</b>
<b>8.1</b>	<b>Factores de estudio del diseño de experimentos</b>	<b>62</b>
<b>8.2</b>	<b>Variables de operación del experimento</b>	<b>63</b>
<b>8.3</b>	<b>Diseño del dispositivo experimental</b>	<b>65</b>
8.3.1	Columna de flotación	65
8.3.2	Desnatador	67
8.3.3	Electrodos	68
<b>9</b>	<b><i>Pruebas de factibilidad del diseño de experimentos</i></b>	<b>71</b>
<b>9.1</b>	<b>Hidráulicas</b>	<b>71</b>
9.1.1	Descripción	71
9.1.2	Resultados	71
<b>9.2</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>73</b>
9.2.1	Evaluación de los electrodos diseñados	73
9.2.2	Evaluación de las conexiones	74
<b>9.3</b>	<b>Fisicoquímicas</b>	<b>76</b>
9.3.1	Prueba de jarras	77
9.3.2	Pruebas de producción de aluminio	82
<b>9.4</b>	<b>De configuración del reactor</b>	<b>84</b>

9.4.1	Descripción	84
9.4.2	Resultados	89
<b>9.5</b>	<b>Conclusiones de pruebas preliminares</b>	<b>94</b>
<b>10</b>	<b><i>Replanteamiento del diseño de experimentos</i></b>	<b>96</b>
<b>10.1</b>	<b>Variables de estudio</b>	<b>96</b>
<b>10.2</b>	<b>Condiciones de operación</b>	<b>97</b>
<b>10.3</b>	<b>Modificación del dispositivo experimental</b>	<b>97</b>
<b>11</b>	<b><i>Experimentos con reactor reconfigurado</i></b>	<b>100</b>
<b>11.1</b>	<b>pruebas de producción de aluminio</b>	<b>100</b>
11.1.1	Descripción	100
11.1.2	Resultados	101
<b>11.2</b>	<b>Diseños de experimentos 2<sup>3</sup></b>	<b>104</b>
11.2.1	Descripción	104
11.2.2	Resultados de las corridas experimentales	106
11.2.3	Análisis estadístico	120
11.2.4	Desarrollo de modelos estadísticos	131
<b>11.3</b>	<b>Repetición de la mejor condición</b>	<b>133</b>
11.3.1	Resultados con la mejor condición	134
<b>12</b>	<b><i>Análisis de costos</i></b>	<b>138</b>
<b>13</b>	<b><i>Conclusiones</i></b>	<b>143</b>
<b>14</b>	<b><i>Recomendaciones</i></b>	<b>144</b>
<b>15</b>	<b><i>Referencias bibliográficas</i></b>	<b>145</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ACOMODO DE ELECTRODOS EN ESPIRAL (TOMADO DE BAJERLE ET AL., 2015).	9
FIGURA 2. DISEÑO DE CELDA ELECTROLÍTICA FORMADA POR DOS ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE EN POSICIÓN HORIZONTAL (MODIFICADO DE GHERNAOUT ET AL., 2014).	10
FIGURA 3. REACTOR TIPO BATCH PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ELECTRO FLOTACIÓN. (1) SECCIÓN DESCENDENTE; (2) SECCIÓN ASCENDENTE; (3) SONDAS DE CONDUCTIVIDAD; (4) CONDUCTÍMETRO; (5) PANEL DE TERMINALES DE ENTRADA/SALIDA; (6) CABLEADO; (7) SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS; (8) ELECTRODOS; (9) DESNATADOR; (10) BURBUJAS GENERADAS ELECTROQUÍMICAMENTE (MODIFICADO DE ESSADKI ET AL., 2008).	11
FIGURA 4. REACTOR DE FLUJO CONTINUO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROCOAGULACIÓN- FLOTACIÓN (MODIFICADO DE HOSSEIN ET AL., 2011).	12
FIGURA 5. REACTOR DE FLUJO CONTINUO DEDICADO A AMPLIAR EL TRH (MODIFICADO DE MOTASHAMI & SHANG, 2018).	13
FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN DEL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN: (1) INFLUENTE; (2) PILA DE ELECTRODOS; (3) ZONA DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN; (4) PAREDES DEL REACTOR; (5) SEGURO DE TAPA DE REACTOR; (6) TAPA DE REACTOR; (7) EFLUENTE; (8) SISTEMA DE CIERRE DE REACTOR; (9) ELECTRODO DE GRAFITO UTILIZADO COMO CONTACTO ELÉCTRICO ENTRE ELECTRODO DE HIERRO Y LA FUENTE DE PODER; (10) COJÍN QUE PERMITE EL SELLADO DE LOS ELECTRODOS CON LAS PAREDES DEL REACTOR; (11) ELECTRODOS BIPOLARES DE HIERRO; (12) CONTACTO ELÉCTRICO DE GRAFITO CON LOS ELECTRODOS DE HIERRO; (13) ZONA DE ESTABILIZACIÓN DE FLUJO ANTES DE ENTRAR AL CONTACTO CON LOS ELECTRODOS; (14) PLACA PERFORADA DE PVC QUE SOPORTA A LOS ELECTRODOS ; (15) SEPARADOR ENTRE ELECTRODOS BIPOLARES; (16) TERMINAL DEL ELECTRODO DE GRAFITO. (TOMADO DE TCHAMANGO Y DARCHEN, 2018).	13
FIGURA 7. REACTOR CON ELECTRODOS COLOCADOS DE MANERA HORIZONTAL (TOMADO DE LÓPEZ ET AL., 2019).	14
FIGURA 8. POTENCIAL Z DE MICROCYSTIS Y CHLORELLA VULGARIS COMO FUNCIÓN DEL PH (WALKER, 2015).	23
FIGURA 9. FUERZAS DE INTERACCIÓN QUE ACTÚAN SOBRE UNA PARTÍCULA EN SUSPENSIÓN (TOMADO DE PABLO CAÑIZARES, 2008)	25
FIGURA 10. VISTA LATERAL DE UN PROCESO DE CLARIFICACIÓN POR FLOTACIÓN (TOMADO DE HENDRICKS, 2011).	28
FIGURA 11. ELECTRONES EN COLISIÓN CON LOS ÁTOMOS DEL MATERIAL CONDUCTOR (GUERRERO & CANDELO, 2011).	29
FIGURA 12. ESQUEMA DEL TRATAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE LA APLICACIÓN DE ELECTROCOAGULACIÓN Y ELECTROFLOTACIÓN (MODIFICADO DE BARRERA, 2014).	32
FIGURA 13. CLASIFICACIÓN DE REACTORES SEGÚN EL TIPO DE FLUJO: IDEAL Y NO IDEAL (MODIFICADO DE BARRERA, 2014).	38
FIGURA 14. ESQUEMA DE LA TÉCNICA DE PULSO, UTILIZANDO NACL COMO TRAZADOR. (1) BOMBA PERISTÁLTICA; (2) INYECCIÓN DE TRAZADOR A PULSO; (3) INFLUENTE; (4) REACTOR DE ECF; (5) CONDUCTÍMETRO; (6) EFLUENTE (ELABORACIÓN PROPIA).	38
FIGURA 15. EVOLUCIÓN DE UNA CURVA DE TRAZADOR POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE PULSO (MODIFICADO DE LEVENSPIEL 1999).	39

FIGURA 16. PROPÓSITOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE DISEÑOS DE EXPERIMENTOS (MODIFICADO DE GUTIÉRREZ Y DE LA VARA, 2012).	42
FIGURA 17. DISTRIBUCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	45
FIGURA 18. FILTRADO DE MUESTRA.	50
FIGURA 19. FILTRO SATURADO	50
FIGURA 20. COLOCACIÓN DE FILTRO DENTRO DE TUBO DE CENTRIFUGA, PREVIO A SU MACERACIÓN.	50
FIGURA 21. HOMOGENEIZADOR DE TEJIDOS UTILIZADO PARA LA MACERACIÓN DEL FILTRO.	50
FIGURA 22. CELDA DE CUARZO ANTES DE ACIDIFICAR .	51
FIGURA 23. CELDA DE CUARZO DESPUÉS DE ACIDIFICAR.	51
FIGURA 24. REACTORES PARA CULTIVOS DE MICROALGAS. A) PREVIO A LA ADICIÓN DE NUTRIENTES; B) DESPUÉS DE LA ADICIÓN DE NUTRIENTES Y MEZCLADO CONSTANTE.	54
FIGURA 25. POSICIONAMIENTO DE REACTORES EN CURVA DE CALIBRACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	55
FIGURA 26. PROYECCIÓN DE SOMBRA HETEROGÉNEA A DIFERENTES HORAS DEL DÍA: A) CONSTRUCCIÓN OBSTRUCTORA EL PASO DE LA LUZ; B) PROYECCIÓN DE SOMBRA; C) RECIPIENTES DE CULTIVO; D) MALEZA OBSTRUCTORA DEL PASO DE LA LUZ (ELABORACIÓN PROPIA).	58
FIGURA 27. COMPARATIVA DE CULTIVOS DEL PRIMER DÍA VS EL ÚLTIMO, EN LA MEDICIÓN DE CLOROFILA-A.	58
FIGURA 28. EVOLUCIÓN DE CLOROFILA-A EN EL TIEMPO (ELABORACIÓN PROPIA).	59
FIGURA 29. EVOLUCIÓN DE FEOFITINA-A EN EL TIEMPO (ELABORACIÓN PROPIA).	59
FIGURA 30. RELACIÓN DE CLOROFILA-A VS COLOR EN LOS DIFERENTES CULTIVOS (ELABORACIÓN PROPIA).	60
FIGURA 31. RELACIÓN DE FEOFITINA-A VS COLOR EN LOS DIFERENTES CULTIVOS (ELABORACIÓN PROPIA).	60
FIGURA 32. VISTA LATERAL DE LAS DIMENSIONES DEL REACTOR: (VE) VÁLVULA DE ESFERA PARA CONTROL DEL FLUJO; (INF) INFLUENTE; (HR) ALTO DE REACTOR; (BR) ANCHO DE REACTOR; (LR) LARGO DE REACTOR; (EFL) EFLUENTE DE COLUMNA DE FLOTACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	66
FIGURA 33. VISTA SUPERIOR DEL REACTOR. (DA) DENTADO DE ACRÍLICO PARA SEPARACIÓN DE ELECTRODOS; (SE) SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS; (BR) ANCHO DE REACTOR; (LR) LARGO DE REACTOR; (EA) ESPESOR DE ACRÍLICO (ELABORACIÓN PROPIA).	66
FIGURA 34. DISEÑO DE DESNATADOR; A) VISTA EXTERIOR FRONTAL Y B) DETALLES DEL INTERIOR (VISTA LATERAL). (1) EFLUENTE DE REACTOR; (2) SEGUNDA CÁMARA DE DESNATADOR; (3) PRIMERA CÁMARA DE DESNATADOR; (4) COLUMNA DE FLOTACIÓN; (5) EFLUENTE DE COLUMNA DE FLOTACIÓN; (6) PARED DE SEPARACIÓN EN ACRÍLICO (ELABORACIÓN PROPIA).	67
FIGURA 35. CANALIZADOR DE ESPUMAS (EN CONCORDANCIA CON FIGURA 34): A) VISTA LATERAL; B) VISTA SUPERIOR; (1) EFLUENTE DE REACTOR; (2) SEGUNDA CÁMARA DE DESNATADOR; (3) PRIMERA CÁMARA DE DESNATADOR; (4) COLUMNA DE FLOTACIÓN; (5) EFLUENTE DE COLUMNA DE FLOTACIÓN; (6) PARED DE SEPARACIÓN EN ACRÍLICO; (7) ELECTRODOS DENTRO DE COLUMNA DE FLOTACIÓN; (8) RECORRIDO DE ESPUMA (ELABORACIÓN PROPIA).	68
FIGURA 36. ARREGLO DE ELECTRODOS EN REACTOR ECF: <i>ax</i> : ÁNODOS DE SACRIFICIO; <i>cx</i> : CÁTODOS (ELABORACIÓN PROPIA).	69
FIGURA 37. ESQUEMA DE LA ZONA INFERIOR DE COLUMNA DE ECF: (INF) INFLUENTE; (HS) ALTURA DE SEDIMENTACIÓN; ( <i>Ce</i> ) CARAS EXTERNAS DE ELECTRODOS INICIAL Y FINAL; ( <i>Ne</i> ) NÚMERO DE ELECTRODOS (ELABORACIÓN PROPIA).	70

FIGURA 38. CURVA DE TRAZADOR GENERADA POR LA TÉCNICA DE PULSO, UTILIZANDO NACL COMO TRAZADOR (PRUEBA 1) (ELABORACIÓN PROPIA).	72
FIGURA 39. SECUENCIA DE IMÁGENES DESPUÉS DE LA INYECCIÓN DE COLORANTE SIN APLICACIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA (PRUEBA 2) (ELABORACIÓN PROPIA).	72
FIGURA 40. SECUENCIA DE IMÁGENES DESPUÉS DE LA INYECCIÓN DE TRAZADOR EN PRESENCIA DE CORRIENTE ELÉCTRICA (PRUEBA 3) (ELABORACIÓN PROPIA).	73
FIGURA 41. VOLTAJE LÍMITE SOPORTADO POR CADA JUEGO DE ELECTRODOS (ELABORACIÓN PROPIA).	74
FIGURA 42. DENSIDAD DE CORRIENTE LÍMITE DE CADA JUEGO DE ELECTRODOS (ELABORACIÓN PROPIA).	74
FIGURA 43. CONEXIONES ELÉCTRICAS. 1) TERMINAL DE GRAPA; 2) FRAGMENTO DE CABLEADO; 3) TORNILLO DE ACERO INOXIDABLE; 4) CABLEADO CALIBRE 12'; 5) CONEXIONES DE FUENTE DE PODER.	75
FIGURA 44. CONEXIONES UTILIZADAS PARA ASEGURAR LA CONTINUIDAD ELÉCTRICA EN LOS ELECTRODOS.	76
FIGURA 45. SECUENCIA DE EJECUCIÓN DE PRUEBAS FISICOQUÍMICAS (ELABORACIÓN PROPIA).	77
FIGURA 46. RESULTADOS DE REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIEDAD EN PRUEBA DE JARRAS, PARA LA OBTENCIÓN DE DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE (ELABORACIÓN PROPIA).	80
FIGURA 47. RESULTADOS DE LA REMOCIÓN DE COLOR EN PRUEBAS DE JARRAS, PARA LA OBTENCIÓN DE DOSIS ÓPTIMA DE POLÍMERO (ELABORACIÓN PROPIA).	81
FIGURA 48. RESULTADOS DE LA REMOCIÓN DE TURBIEDAD EN PRUEBAS DE JARRAS PARA LA OBTENCIÓN DE DOSIS ÓPTIMA DE POLÍMERO (ELABORACIÓN PROPIA).	81
FIGURA 49. PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN DE ALUMINIO RESPECTO A LA PRODUCCIÓN TEÓRICA DE LOS DIFERENTES TAMAÑOS DE ELECTRODOS (ELABORACIÓN PROPIA).	84
FIGURA 50. REACTOR DE FLUJO HORIZONTAL (FH): 1) ENTRADA DE AGUA; 2) ELECTRODOS DE SACRIFICIO; 3) FUENTE DE PODER; 4) CONEXIONES ELÉCTRICAS; 5) SALIDA DE AGUA. IMAGEN TOMADA DE RUIZ, 2021.	85
FIGURA 51. DINÁMICA DE LOS COMPONENTES EN LAS 3 CONFIGURACIONES ANALIZADAS. A): FLUJO VERTICAL ASCENDENTE (FVA); B) FLUJO VERTICAL DESCENDENTE (FVD)); C) FLUJO HORIZONTAL (FH). INF: INFLUENTE; EFL: EFLUENTE (ELABORACIÓN PROPIA).	86
FIGURA 52. REACTOR DE CONFIGURACIÓN VERTICAL (VISTA FRONTAL).	86
FIGURA 53. REACTOR DE CONFIGURACIÓN HORIZONTAL (VISTA LATERAL).	86
FIGURA 54. DESCRIPCIÓN DE LAS TRES ETAPAS DE EVALUACIÓN DEL AGUA TRATADA EN EL REACTOR CON CONFIGURACIÓN VERTICAL (ELABORACIÓN PROPIA).	88
FIGURA 55. DESCRIPCIÓN DE LAS TRES ETAPAS DE EVALUACIÓN DEL AGUA TRATADA EN EL REACTOR CON CONFIGURACIÓN HORIZONTAL (ELABORACIÓN PROPIA).	89
FIGURA 56. REMOCIÓN DE COLOR APARENTE EN LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES (ELABORACIÓN PROPIA).	91
FIGURA 57. ACUMULACIÓN DE ESPUMA EN UNA CONFIGURACIÓN VERTICAL EN OPERACIÓN (VISTA SUPERIOR).	93
FIGURA 58. ACUMULACIÓN DE ESPUMA EN UNA CONFIGURACIÓN HORIZONTAL EN OPERACIÓN (VISTA SUPERIOR).	93
FIGURA 59. REACTOR DE EF: A) ELECTRODOS; B) ALTURA LIBRE SOBRE ELECTRODOS; C) EFLUENTE DE COLUMNA DE FLOTACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	99

FIGURA 60. PUNTOS DE TOMA DE MUESTRA DE ALUMINIO EN DISPOSITIVO EXPERIMENTAL (ELABORACIÓN PROPIA).	100
FIGURA 61. ACUMULACIÓN DE ESPUMA EN COLUMNA DE FLOTACIÓN, EXPERIMENTOS A PH = 5.5.	102
FIGURA 62. ACUMULACIÓN DE HIDROGEL A PH = 9.	102
FIGURA 63. CULTIVO DE MICROALGAS UTILIZADAS COMO AGUA PROBLEMA.	104
FIGURA 64. PROCESO DE RECOLECTA DE MICROALGAS Y APLICACIÓN DE ECF: A) ÁREA DE CULTIVOS DE MICROALGAS; B) RECIPIENTE DE MEZCLADO DE AGUA DE CULTIVOS; C) TRATAMIENTO DE ECF; D) EFLUENTE DE AGUA TRATADA (ELABORACIÓN PROPIA).	104
FIGURA 65. MUESTRAS DE AGUA CRUDA DE LOS TRES DISEÑOS DE EXPERIMENTOS.	106
FIGURA 66. CORRIDA CON MAYOR REMOCIÓN DE COLOR (CORRIDA NÚMERO 2). A) PRIMERA PRUEBA EXPERIMENTAL (CL-A: 59 $\mu$ G/L); B) SEGUNDA PRUEBA EXPERIMENTAL (CL-A: 120 $\mu$ G/L); C) TERCERA PRUEBA EXPERIMENTAL (CL-A: 139 $\mu$ G/L).	108
FIGURA 67. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE LA CORRIDA MÁS EFICIENTE EN LOS TRES DISEÑOS DE EXPERIMENTOS (ELABORACIÓN PROPIA).	114
FIGURA 68. RELACIÓN ENTRE EL PH INICIAL DEL AGUA EN CADA PRUEBA Y LA CONDUCTIVIDAD FINAL DE ESTA (ELABORACIÓN PROPIA).	115
FIGURA 69. RESPUESTA DEL PH DESPUÉS DE UN PROCESO DE ECF (ELABORACIÓN PROPIA).	116
FIGURA 70. PRIMER DISEÑO DE EXPERIMENTOS. A) CORRIDA 2; B) CORRIDA 6.	118
FIGURA 71. SEGUNDO DISEÑO DE EXPERIMENTOS. A) CORRIDA 2; B) CORRIDA 5.	119
FIGURA 72. TERCER DISEÑO DE EXPERIMENTOS. A) CORRIDA 2; B) CORRIDA 5.	119
FIGURA 73. GRÁFICOS DE PARETO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS. FACTORES SIGNIFICATIVOS EN LA REMOCIÓN DE COLOR APARENTE MEDIDO EN ER (ELABORACIÓN PROPIA).	123
FIGURA 74. GRÁFICOS DE PARETO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS. FACTORES SIGNIFICATIVOS EN LA REMOCIÓN DE COLOR APARENTE MEDIDO EN ERS (ELABORACIÓN PROPIA).	124
FIGURA 75. GRÁFICOS DE PARETO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS. FACTORES SIGNIFICATIVOS EN LA REMOCIÓN DE COLOR APARENTE MEDIDO EN ERF (ELABORACIÓN PROPIA).	125
FIGURA 76. DINÁMICA DE MEZCLADO ENTRE FLUJOS CON ELECTRODOS DE 1.03 M. A): COLUMNA DE FLOTACIÓN; B): POSICIÓN DE ELECTRODOS (ELABORACIÓN PROPIA).	131
FIGURA 77. DINÁMICA DE MEZCLADO ENTRE FLUJOS CON ELECTRODOS 0.17 M. A): COLUMNA DE FLOTACIÓN; B): POSICIÓN DE ELECTRODOS (ELABORACIÓN PROPIA).	131
FIGURA 78. RESULTADOS DE REPETICIÓN DE MEJOR CONDICIÓN. A) ANTES DEL TRATAMIENTO; B) DESPUÉS DEL TRATAMIENTO.	135
FIGURA 79 DINÁMICA DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LA INTERFAZ AIRE-AGUA (MODIFICADO DE "KARST GEOCHEMISTRY AND HIDROGEOLOGY", 2014).	140

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MÉTODOS DE REMOCIÓN DE MICROALGAS (ELABORACIÓN PROPIA).	4
TABLA 2. ESCALA DE VALORES DEL ESTADO TRÓFICO EN LOS CUERPOS DE AGUA. (MODIFICADO DE MORENO, 2010).	21
TABLA 3. VALORES DE GRADIENTES DE VELOCIDAD Y TIEMPO DE RETENCIÓN RECOMENDADOS POR LA LITERATURA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE FLOCULACIÓN (TOMADO DE HENDRICKS, 2011).	27
TABLA 4. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS EN LA METODOLOGÍA DEL EXPERIMENTO (ELABORACIÓN PROPIA).	46
TABLA 5. PARÁMETROS EVALUADOS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA (ELABORACIÓN PROPIA).	48
TABLA 6. EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES FILTROS PROPUESTOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE CLOROFILA-A (ELABORACIÓN PROPIA).	52
TABLA 7. RESULTADOS DE LECTURAS DE COLOR, CLOROFILA-A Y FEOFITINA-A EN EL TIEMPO (ELABORACIÓN PROPIA).	57
TABLA 8. CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE CLOROFILA-A DE CUERPOS DE AGUA EN MÉXICO (ELABORACIÓN PROPIA).	60
TABLA 9. VARIABLES DE ESTUDIO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PRELIMINAR (ELABORACIÓN PROPIA).	63
TABLA 10. VARIABLES DE DISEÑO Y OPERACIÓN DEL EXPERIMENTO (ELABORACIÓN PROPIA).	64
TABLA 11. CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA PRUEBA DE TRAZADORES (ELABORACIÓN PROPIA).	71
TABLA 12. CONDICIONES INICIALES DE AGUA CON MICROALGAS (ELABORACIÓN PROPIA).	77
TABLA 13. CONDICIONES DE OPERACIÓN EN PRUEBA DE JARRAS (ELABORACIÓN PROPIA).	77
TABLA 14. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE FLOCULANTES UTILIZADOS EN PRUEBA DE JARRAS (ELABORACIÓN PROPIA).	78
TABLA 15. PRUEBA DE JARRAS PARA ENCONTRAR DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE (ELABORACIÓN PROPIA).	79
TABLA 16. PRUEBA DE JARRAS PARA ENCONTRAR DOSIS ÓPTIMA DE POLÍMERO CATIÓNICO, APLICANDO UNA DOSIS DE $Al^{3+}$ DE 10 MG/L (ELABORACIÓN PROPIA).	79
TABLA 17. PRUEBA DE JARRAS PARA ENCONTRAR DOSIS ÓPTIMA DE POLÍMERO ANIÓNICO, APLICANDO UNA DOSIS DE $Al^{3+}$ DE 10 MG/L (ELABORACIÓN PROPIA).	80
TABLA 18. RESULTADOS DE LA PRODUCCIÓN DE ALUMINIO EN EL TIEMPO (ELABORACIÓN PROPIA).	83
TABLA 19. CONDICIONES INICIALES DEL AGUA EN LAS PRUEBAS DE EVALUACIÓN DE REACTOR (ELABORACIÓN PROPIA).	87
TABLA 20. CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA CADA CONFIGURACIÓN DE REACTOR (ELABORACIÓN PROPIA).	88
TABLA 21. REMOCIÓN DE COLOR APARENTE CON UN PROCESO DE ECF EN DIFERENTES CONFIGURACIONES DE FLUJO (ELABORACIÓN PROPIA).	92
TABLA 22. TABLA DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS 2 <sup>3</sup> (ELABORACIÓN PROPIA).	96
TABLA 23. VARIABLES DE ESTUDIO Y OPERACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DE EXPERIMENTOS (ELABORACIÓN PROPIA).	97

TABLA 24. CONDICIONES Y COMPONENTES RESULTANTES DEL REPLANTEAMIENTO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS (ELABORACIÓN PROPIA).	98
TABLA 25. RESULTADOS EN PRUEBAS PRELIMINARES DE ALUMINIO (ELABORACIÓN PROPIA).	103
TABLA 26. CONDICIONES INICIALES DE LOS DISEÑOS DE EXPERIMENTOS (ELABORACIÓN PROPIA).	106
TABLA 27. RESULTADOS DEL PRIMER DISEÑO DE EXPERIMENTOS: CL-A= 59 $\mu\text{G/L}$ ; COLOR APARENTE INICIAL: 202 U PT-CO (ELABORACIÓN PROPIA).	109
TABLA 28. RESULTADOS DEL SEGUNDO DISEÑO DE EXPERIMENTOS: CL-A= 120 $\mu\text{G/L}$ ; COLOR APARENTE INICIAL: 452 U PT-CO (ELABORACIÓN PROPIA).	110
TABLA 29. RESULTADOS DEL TERCER DISEÑO DE EXPERIMENTOS: CL-A= 139 $\mu\text{G/L}$ ; COLOR APARENTE INICIAL: 844 U PT-CO (ELABORACIÓN PROPIA).	111
TABLA 30. EXPERIMENTOS CON MEJORES RESULTADOS PARA LA REMOCIÓN DE COLOR (ELABORACIÓN PROPIA).	112
TABLA 31. RESULTADOS DE LA CORRIDA MÁS EFICIENTE (NÚMERO 2), EN LOS DIFERENTES DISEÑOS DE EXPERIMENTOS (ELABORACIÓN PROPIA).	113
TABLA 32. VOLTAJES DEMANDADOS EN LOS TRES DISEÑOS DE EXPERIMENTOS (ELABORACIÓN PROPIA).	117
TABLA 33. DISEÑO DE EXPERIMENTOS $3 \times 2^3$ . DENSIDAD DE CORRIENTE COMO FACTOR A (ELABORACIÓN PROPIA).	121
TABLA 34. DISEÑO DE EXPERIMENTOS. ALTURA LIBRE SOBRE ELECTRODOS COMO FACTOR A' (ELABORACIÓN PROPIA).	122
TABLA 35. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS FACTORES DE DISEÑO SOBRE LA REMOCIÓN DE COLOR (ELABORACIÓN PROPIA).	126
TABLA 36. MODELOS MATEMÁTICOS CON MEJOR AJUSTE EN EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA REMOCIÓN DE COLOR APARENTE. DENSIDAD DE CORRIENTE COMO FACTOR A (ELABORACIÓN PROPIA).	132
TABLA 37. MODELOS MATEMÁTICOS CON MEJOR AJUSTE EN EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA REMOCIÓN DE COLOR APARENTE. ALTURA LIBRE SOBRE ELECTRODOS COMO FACTOR A (ELABORACIÓN PROPIA).	133
TABLA 38. CONDICIONES DE MEJOR CONDICIÓN A UNA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A DE 66 $\mu\text{G/L}$ (ELABORACIÓN PROPIA).	133
TABLA 39. CONDICIONES INICIALES DE AGUA CRUDA EN LA REPETICIÓN DE LA MEJOR CONDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	134
TABLA 40. VALORES FINALES Y EFICIENCIAS DE REMOCIÓN EN LA REPETICIÓN DE LA MEJOR CONDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	134
TABLA 41. COMPARACIÓN DE VALOR REAL VS VALOR TEÓRICO DEL COLOR APARENTE EN LA PRUEBA DE LA MEJOR CONDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	134
TABLA 42. COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS APLICADOS PARA LA REMOCIÓN DE MICROALGAS EN MATERIA DE POTABILIZACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA). N/E: NO ESPECIFICADO.	137
TABLA 43. COSTOS EN MONEDA NACIONAL (2021) DE INSUMOS UTILIZADOS PARA PROCESO DE ECF (ELABORACIÓN PROPIA).	138
TABLA 44. ANÁLISIS DE COSTOS (MXN) EN TRES CONDICIONES DE OPERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	142
TABLA 45. SISTEMAS DE ECF PARA LA REMOCIÓN DE MICROALGAS (ELABORACIÓN PROPIA).	142

## RESUMEN

La presencia de microalgas en los cuerpos de agua naturales (debido a la eutrofización), trae consigo distintos problemas que complican la operación de los sistemas de potabilización. Utilizar procesos de coagulación/floculación química para su remoción implica el uso excesivo de coagulante, y por lo tanto, un mayor costo de operación y una mayor producción de lodos. En este trabajo de investigación se propone la electrocoagulación/flotación (ECF), como una alternativa capaz de remover estos microorganismos sin necesidad de agregar agentes químicos. Se evaluaron los parámetros de color aparente (Pt-Co) y clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) como indicadores de la presencia de microalgas; el sistema planteado propone su remoción por medio de su flotación, analizando el efecto de los siguientes factores: densidad de corriente, dosis de coagulante, pH y altura libre sobre electrodos. Una remoción del 99% (tanto de clorofila-a como de color aparente), fue obtenida bajo condiciones de densidad de corriente de  $60 \text{ A/m}^2$ , dosis de coagulante de  $10 \text{ mg/L}$ , pH de 5.5, y altura libre sobre electrodos de 87 cm, sin embargo, los resultados mostraron que la ECF, a pesar de resultar viable técnicamente para remover las microalgas, requiere el ajuste del pH en el agua a tratar, lo que eleva los costos de operación y hacen el sistema, por el momento, poco competitivo económicamente hablando, si se compara con los procesos convencionales (coagulación química). Es necesario seguir optimizando el diseño de reactores de EFC con fines de potabilización, para mejorar la factibilidad del sistema.

## **ABSTRACT**

The presence of microalgae in natural water bodies (due to eutrophication) brings with it different problems that complicate the operation of drinking water systems. Using chemical coagulation/flocculation processes for its removal implies the excessive use of coagulant, and therefore, a higher cost of operation and a greater production of sludge. In this research work, electrocoagulation/flotation (ECF) is proposed as an alternative capable of removing these microorganisms without the need to add chemical agents. Apparent color (Pt-Co) and chlorophyll-a ( $\mu\text{g/L}$ ) parameters were evaluated as indicators of the presence of microalgae; The proposed system proposes its removal by means of its flotation, analyzing the effect of the following factors: current density, coagulant dose, pH and free height above electrodes. A removal of 99% (both chlorophyll-a and apparent color) was obtained under conditions of current density of  $60 \text{ A/m}^2$ , coagulant dose of  $10 \text{ mg/L}$ , pH of 5.5, and free height above electrodes of 87 cm, however, the results showed that ECF, despite being technically feasible to remove microalgae, requires adjustment of the pH of the water to be treated, which increases operating costs and makes the system, for the time being, , economically uncompetitive, when compared to conventional processes (chemical coagulation). It is necessary to continue optimizing the design of EFC reactors for potabilization purposes, to improve the feasibility of the system.

## 1 INTRODUCCIÓN

Tanto las microalgas como las cianobacterias son coloides incluidos en el dominio de las bacterias, organismos fotosintéticos que forman parte del fitoplancton en las aguas superficiales. A manera de simplificación, en este estudio ambas son mencionadas como microalgas.

Estos microorganismos, dependiendo del contexto, pueden ser considerados como benéficos o perjudiciales, ya que en condiciones de eutrofización, crecen masivamente en los cuerpos de agua (ríos, presas o lagos). Este tipo de fenómenos son conocidos como “floración microalga” o “bloom”, que traen aparejados una serie de impactos ambientales negativos y efectos adversos a la salud del ser humano al ingerir agua que los contenga.

Durante la potabilización del agua con fines de uso y consumo humano, los procesos convencionales constan generalmente de cuatro etapas: cribado, coagulación/floculación/sedimentación, filtración por arena y desinfección. Cuando el agua de abastecimiento contiene microalgas, la mayor parte de estas es removida en la etapa de coagulación/floculación/sedimentación, pero si el proceso no es eficiente, las células que pasan a los filtros provocan el taponamiento de éstos, y durante la desinfección aumentan el consumo de cloro.

Desde una perspectiva diferente, es común encontrar sistemas de tratamiento de agua que se enfocan en la extracción de estos microorganismos con fines de comercialización, para la creación de suplementos nutritivos ricos en vitaminas y proteínas, además de ser una atractiva opción en el sector energético para la producción de biocombustibles (Dries *et al.*, 2020; González *et al.*, 2020; Fassei *et al.*, 2018; Valeriano, 2018; Gomes *et al.*, 2014; Velásquez *et al.*, 2014).

La comercialización de microalgas involucra un proceso de cosecha (Harvestig), el cual se divide en 3 etapas: espesamiento (Thickening), separación (Dewatering) y deshidratación (Drying). En el espesamiento, las microalgas son aglomeradas y después separadas del agua; en esta etapa se involucran tecnologías como: coagulación/floculación/sedimentación, auto y biofloculación, sedimentación por gravedad, flotación, procesos electroquímicos (electrocoagulación/flotación), filtración y/o centrifugación.

Los procesos de cosecha de microalgas no pueden ser comparados con un tren de potabilización del agua, debido a que en este último no existe una ganancia económica directa, lo cual hace poco costoso el uso de tecnologías con altos consumos energéticos, operacionales y de mantenimiento.

Para los fines buscados en este estudio, es importante identificar las tecnologías utilizadas para la remoción de microalgas, e identificar cuáles pueden ser utilizadas en la potabilización del agua. Las más comunes son descritas en la Tabla 1.

**Tabla 1. Métodos de remoción de microalgas (elaboración propia).**

Tecnología	Principio	Aplicación	Consumo energético	Desde un punto de vista de potabilización	
				Ventajas	Desventajas
Auto y biofloculación	Se basa en la liberación de sustancias poliméricas extracelulares de ciertas especies de microalgas, que generan la aglomeración de estas y su posterior sedimentación.	Cosecha	Nulo	Sistema económico (Orta 2017; Barros <i>et al.</i> , 2015) y sencillo. No requiere coagulantes o floculantes (Gerardo <i>et al.</i> , 2015; Shen, 2014);	Técnica que depende del pH y de la presencia de Ca y Mg (Gerardo <i>et al.</i> , 2015; Christenson <i>et al.</i> , 2011). Existe la probabilidad de contaminación biológica (Orta <i>et al.</i> , 2017; Barros <i>et al.</i> , 2015)
Centrifugación	Basado en la fuerza centrífuga, que separa las microalgas del medio acuoso, debido a la diferencia de densidades entre sus células y el agua.	Cosecha	Se estima un consumo energético de 8 kWh por m <sup>3</sup> de microalgas en suspensión (Niaghi <i>et al.</i> , 2015)	No requiere aditivos químicos; es capaz de cosechar una gran cantidad de masa seca en un solo paso (Fassei <i>et al.</i> , 2018; Orta <i>et al.</i> , 2017; Niaghi, <i>et al.</i> , 2015; Barros <i>et al.</i> , 2015); evita el deterioro de la calidad de biomasa; capaz de tratar con varias especies de microalgas (Orta <i>et al.</i> , 2017; Barros <i>et al.</i> , 2015).	Altos costos de inversión y altos consumos energéticos (Kim <i>et al.</i> , 2015; Niaghi <i>et al.</i> , 2015; Barros <i>et al.</i> , 2015; Christenson <i>et al.</i> , 2011).
Coagulación /Floculación química	La carga eléctrica de las microalgas es neutralizada por medio de la adición de sales metálicas para generar aglomerados de ellas (flocs), que después pueden removerse por sedimentación o flotación.	Potabilización y cosecha	Nulo, a menos que se agregue un mezclador mecánico.	No requiere de operación o equipo especializado; bajos consumos energéticos (Fassei <i>et al.</i> , 2018; Orta <i>et al.</i> , 2017; Barros <i>et al.</i> , 2015; Gerardo <i>et al.</i> , 2015).	Aumento en los sólidos disueltos totales; contaminación por parte del metal utilizado (Niaghi <i>et al.</i> , 2015); es necesario el ajuste de pH para obtener una remoción eficiente (95%), en ocasiones requiere de altas concentraciones de coagulante (hasta 700 mg/L), lo que incrementa los costos de operación (Barros <i>et al.</i> , 2015; Gerardo <i>et al.</i> , 2015).
Electrocoagulación /Flotación	Se utilizan electrodos de sacrificio capaces de liberar un metal coagulante para formar flocs con el	Cosecha.	Hasta 1.5 kWh por m <sup>3</sup> de microalgas en suspensión (Niaghi <i>et al.</i> , 2015; Gerardo <i>et al.</i> , 2015)	Evita la disolución de aniones en el medio; las burbujas generadas ayudan a la remoción del contaminante	El utilizar electrodos de sacrificio aumenta los costos de operación debido a su desgaste y constante sustitución; difícil

**Tabla 1. Métodos de remoción de microalgas (elaboración propia).**

Tecnología	Principio	Aplicación	Consumo energético	Desde un punto de vista de potabilización	
				Ventajas	Desventajas
	contaminante. A diferencia de la coagulación/ floculación convencional, libera burbujas de oxígeno e hidrógeno capaces de adherirse a los flocs previamente formados para su posterior remoción por flotación o sedimentación.		<i>al.</i> , 2015).	por flotación; reduce la cantidad de lodos generados; aplicable a una gran variedad de microalgas; es capaz de remover flocs frágiles (Orta <i>et al.</i> , 2017; Barros <i>et al.</i> , 2015).	dimensionamiento de reactores; la pasivación de electrodos es una realidad, lo que disminuye la eficiencia del proceso (Moussa <i>et al.</i> , 2016; Christenson <i>et al.</i> , 2011).
Electroflotación	A diferencia de la electrocoagulación/flotación, la electroflotación prescinde de la utilización de electrodos de sacrificio y por lo tanto de la liberación de coagulante.	Cosecha	Hasta 8 kWh por m <sup>3</sup> de microalgas en suspensión (Wiley <i>et al.</i> , 2014).	No requiere del cambio de los electrodos; evita la contaminación de agua por metales. Método atractivo para la remoción de microalgas en agua salada (Muylaert <i>et al.</i> , 2017; Kyochan <i>et al.</i> , 2015)	Necesita de mayores tiempos de operación para obtener eficiencias del 90%; altos consumos energético (Kyochan <i>et al.</i> , 2015).
Filtración por membrana	Se genera la separación de las microalgas del medio, debido a la diferencia entre el tamaño de una microalga y el del poro del filtro.	Cosecha	Hasta 2.3 kWh por m <sup>3</sup> de microalgas en suspensión (Gerardo <i>et al.</i> , 2015).	Altas eficiencias de recuperación; no requiere de ningún agregado químico (Jacob <i>et al.</i> , 2018; Muylaert <i>et al.</i> , 2017; Fassei <i>et al.</i> , 2018; Christenson <i>et al.</i> , 2011).	El taponamiento de las membranas aumenta considerablemente el costo de operación. (Jacob <i>et al.</i> , 2018; Fassei <i>et al.</i> , 2018; Muylaert <i>et al.</i> , 2017; Barros <i>et al.</i> , 2015; Christenson <i>et al.</i> , 2011)
Flotación por aire disuelto (DAF)	Los flocs previamente formados, entran en contacto con una corriente de burbujas de aire disuelto, lo que provoca que los contaminantes floten y se mantengan en la superficie.	Potabilización y cosecha	Hasta 8 kWh por m <sup>3</sup> de microalgas en suspensión (Gerardo <i>et al.</i> , 2015)	Bajos tiempos de operación; método de bajo costo; baja necesidad de espacio para montado de equipos, gran variedad de equipos debido a su común implementación a escala real (Jacob <i>et al.</i> , 2018; Barros <i>et al.</i> , 2015; Christenson <i>et al.</i> , 2011).	Necesita de un surfactante o coagulante que disminuya la carga negativa de las microalgas para poder ser adheridas a las burbujas generadas (Muylaert <i>et al.</i> , 2017). Si no existe un equilibrio entre el uso de coagulante, el mezclado del medio y las burbujas generadas, los flocs pueden incrementar su

**Tabla 1. Métodos de remoción de microalgas (elaboración propia).**

Tecnología	Principio	Aplicación	Consumo energético	Desde un punto de vista de potabilización	
				Ventajas	Desventajas
					tamaño a tal grado de dificultar su flotación (Gerardo <i>et al.</i> , 2015).
Sedimentación por gravedad	El desarrollo de una alta densidad celular en la superficie genera el deterioro de las células del fondo, generando su muerte y por consecuencia su sedimentación.	Cosecha	< 0.1 kWh por metro cúbico de agua tratada (Gerardo <i>et al.</i> , 2015)	Método de bajo costo (Jacob <i>et al.</i> , 2018; Fassei <i>et al.</i> , 2018; Muylaert <i>et al.</i> , 2017; Gerardo <i>et al.</i> , 2015)	Depende de la cantidad de nutrientes entrantes al medio (C, N y P); método muy lento. Requiere de un amplio espacio para el montaje de sus tanques (Muylaert <i>et al.</i> , 2017; Gerardo <i>et al.</i> , 2015). En ciertos casos es considerada como ineficiente debido a la oposición de las microalgas a sedimentar (Barros <i>et al.</i> , 2015).

Además de los métodos convencionales descritos en la Tabla 1, existen tecnologías emergentes como: flotación por ozono, ultrasonido, peletización de microalgas, magneto-foresis entre otras. Dichas tecnologías continúan siendo motivo de estudio con el objetivo de mejorarlas.

Entre los métodos más factibles para la remoción de microalgas con fines de potabilización se encuentran: la coagulación/floculación y la flotación por aire disuelto (DAF). Aunque los procesos electroquímicos no son considerados en este contexto, existen autores que lo proponen como una atractiva opción siempre y cuando éstos sean acompañados de un proceso subsecuente de filtración (Campos *et al.*, 2020).

Debido a la baja densidad de las microalgas per se, y a su tendencia a flotar (Jacob *et al.*, 2018; Barros *et al.*, 2015), en este trabajo se propone la aplicación de un proceso de electrocoagulación/flotación (ECF) como método de remoción para su aplicación en un tren de potabilización. La ECF consiste, en su forma más simple, en una celda electrolítica compuesta por un ánodo y un cátodo que forman un circuito al estar conectados a una fuente de corriente directa. Este flujo de electrones genera la oxidación del ánodo, y como consecuencia, la liberación de un agente coagulante in situ. La generación del coagulante está acompañada por la formación de burbujas de gas, debido a los procesos redox involucrados en las reacciones electroquímicas. Estas burbujas coadyuvan en la remoción de los contaminantes por flotación cuando éstos no tienen las características requeridas para sedimentar (Rivera *et al.*, 2006).

Además, la ECF, comparada con otras tecnologías existentes, es considerada como eficiente energéticamente (Niaghi *et al.*, 2015; Gerardo *et al.*, 2015). Un proceso de remoción eficiente por medio de ECF no debería depender de la especie de alga presente en el medio y debe presentar bajos consumos energéticos (Barros *et al.*, 2015).

Una de las desventajas principales de estos sistemas, es la dificultad para dimensionar sus reactores, por ello, este trabajo involucra profundizar en el conocimiento de un proceso de ECF, tomando en cuenta aspectos electroquímicos, hidráulicos y de configuración del prototipo experimental.

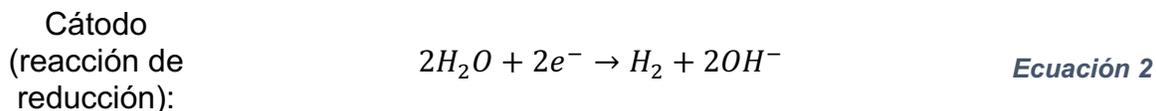
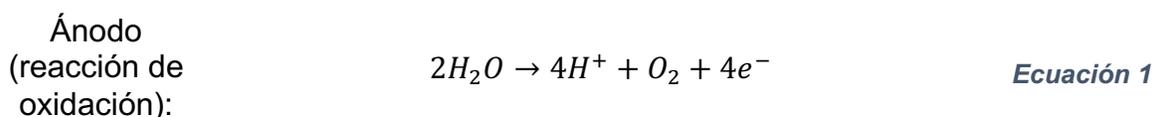
## 2 ANTECEDENTES

La ECF es una técnica que ha demostrado ser una opción viable para el tratamiento de agua residual (Navarro, 2007), con metales pesados (Al-Qodah y Al-Shannag, 2017), residuos textiles (Essadki *et al.*, 2008), y con microalgas (Parmentier *et al.*, 2020; Landels *et al.*, 2019; Wiley *et al.*; 2016; Golzary *et al.*, 2015; Gomes *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2010).

Tanto la ECF como la coagulación/floculación química (CQ), son métodos de remoción que involucran la interacción de la materia coloidal con coagulantes metálicos, provocando la sedimentación y/o flotación de los coloides. La ECF cuenta con algunas ventajas sobre un proceso de CQ:

- No existen aniones como los sulfatos o cloruros que comúnmente acompañan a un coagulante convencional (Barros *et al.*, 2015; Gerardo *et al.*, 2015; Christenson y Sims, 2011)
- Disminución en la producción de lodos como subproducto generado. (Moussa *et al.*, 2016)
- La ECF resulta ser versátil en cuanto a la especie de microalga presente en el medio (Orta *et al.*, 2017; Barros *et al.*, 2015).
- Los flocs formados en la ECF, son más consistentes y con menos agua que los generados en CQ (Moussa *et al.*, 2016).
- La generación de burbujas de O<sub>2</sub> en el ánodo y de H<sub>2</sub> en el cátodo, contribuye a la separación del contaminante del agua por medio de flotación.

La generación de burbujas se produce mediante la electrólisis del agua, obedeciendo a las reacciones en los electrodos plasmadas en la Ecuación 1 y Ecuación 2:



Existen distintos estudios que evalúan y analizan los efectos de ciertos parámetros involucrados en un proceso de ECF, con intención de entender y mejorar la técnica en sus distintas áreas.

Yang *et al.* (2010), por ejemplo, evaluaron los efectos de la densidad de corriente, material del electrodo, pH y temperatura. En cuanto a la densidad de corriente y el pH, El estudio concluye que la variación de estos factores, a pesar de tener efectos directos sobre el proceso de ECF, están limitados a un punto de máxima eficiencia. Se contrastaron los materiales de los electrodos (aluminio y hierro),

obteniendo una mayor remoción de las microalgas con aluminio, además se obtuvo una remoción en menor tiempo a altas temperaturas (36 °C).

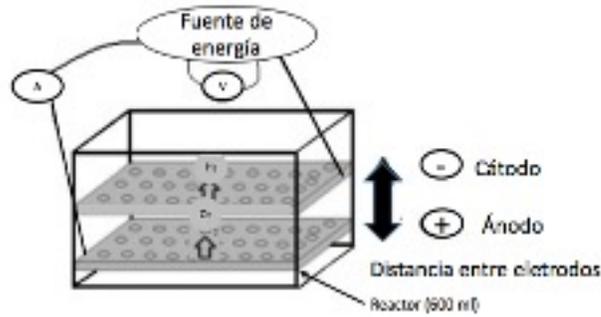
La densidad de corriente es un factor que no depende sólo de la corriente eléctrica aplicada, sino también del área del electrodo al que se le aplique dicho flujo de electrones. En 2015, Bajerle *et al.* plantearon una alternativa al acomodo y área de un electrodo en la ECF, sugiriendo la implementación de electrodos en espiral, fabricados tanto de aluminio como de hierro (ver Figura 1). En ese estudio se concluyó que, bajo las mismas condiciones, se alcanzan remociones de microalgas del 80% con electrodos de aluminio, mientras que con los electrodos de hierro se obtuvo una eficiencia de 64%. También se hizo hincapié en los problemas a la salud humana que el aluminio puede provocar, argumentando que la presencia de este ion en el cuerpo humano está relacionada con la enfermedad de Alzheimer.



*Figura 1. Acomodo de electrodos en espiral (tomado de Bajerle et al., 2015).*

Existen estudios que evalúan la interacción de ciertos iones asociados al proceso de ECF para la remoción de microalgas. En el año 2010, Gao *et al.* realizaron la evaluación de iones  $\text{Cl}^-$  en el medio electrolítico de una celda de ECF, concluyendo que esta práctica aumenta la velocidad de remoción de las microalgas, debido al aumento de la conductividad de la solución, modificación del potencial Z de dichos microorganismos y a la disminución de la formación de una capa de óxido sobre la superficie del electrodo que evita su pasivación.

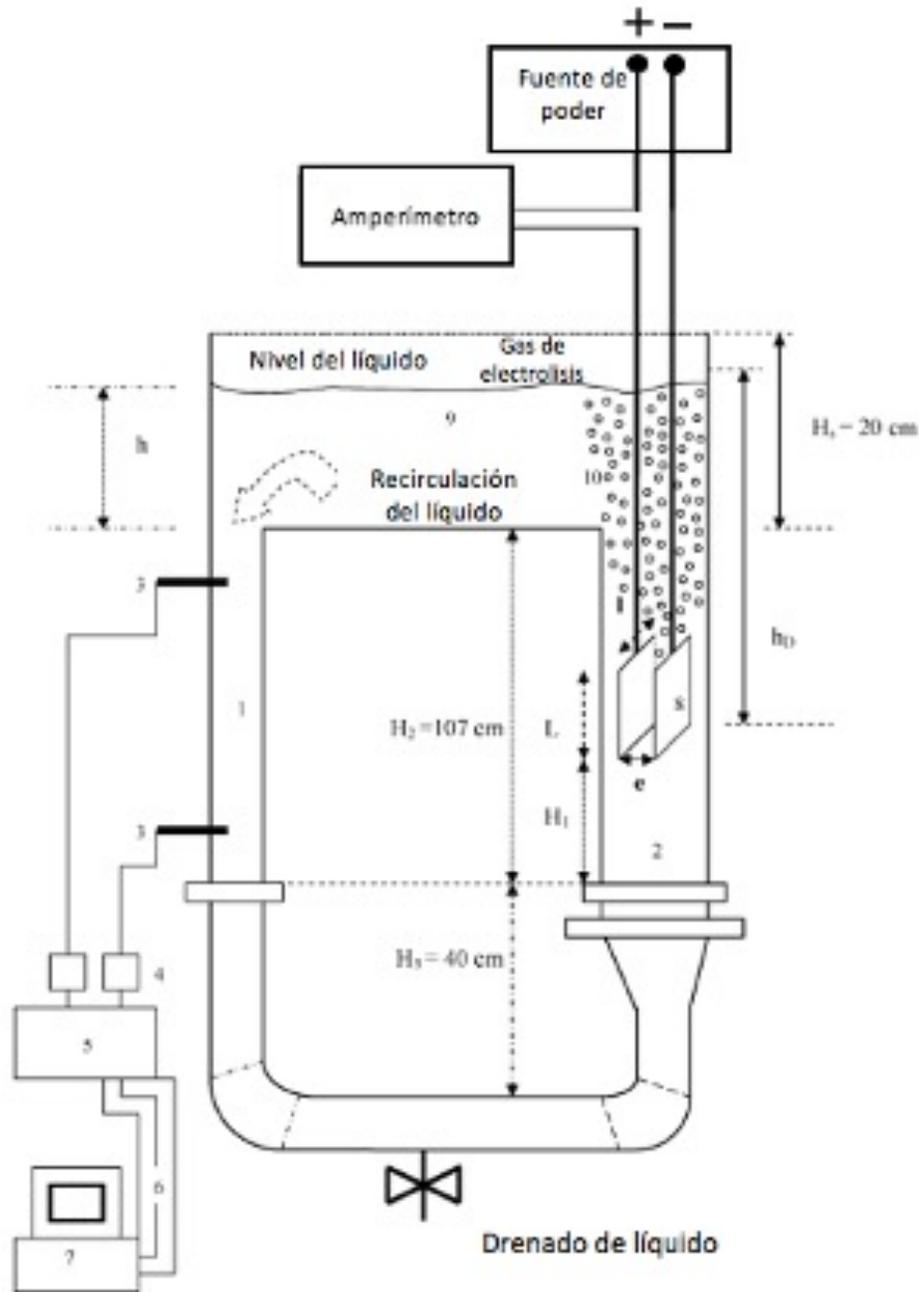
Ghernaout *et al.* (2014) comprobaron que no necesariamente se requiere la formación de coagulante metálico para la remoción de las microalgas, ya que es posible lograrlo sólo con la producción de burbujas generadas en electrodos hechos de acero inoxidable. En este estudio fue posible remover el 99% de las microalgas por el proceso de electro/flotación (EF), con un consumo de energía de 7.95 kWh. En la Figura 2 se observa el acomodo de los electrodos en esta celda electrolítica.



**Figura 2. Diseño de celda electrolítica formada por dos electrodos de acero inoxidable en posición horizontal (modificado de Ghernaout et al., 2014).**

A pesar de la reconocida tendencia de algunos contaminantes a flotar, existen pocos estudios que contemplen los factores hidráulicos y estructurales (o de configuración) de un reactor para remover coloides con dicha predisposición.

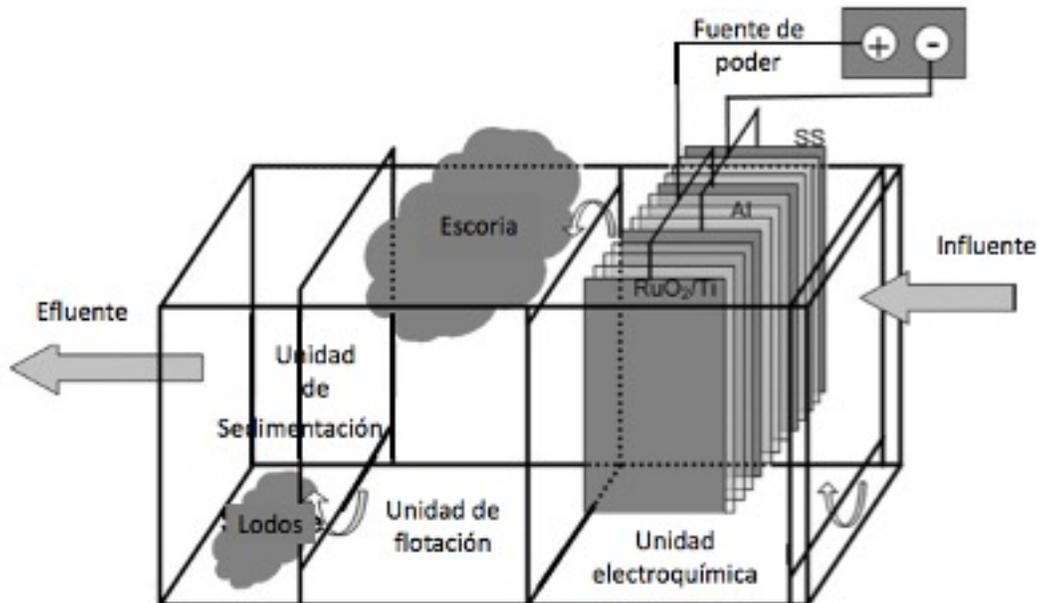
En 2008, Essadki *et al.* resaltaron los beneficios de considerar un reactor batch con una etapa dedicada específicamente a la flotación y otra a la sedimentación; en la Figura 3, se aprecia la ubicación de los electrodos de trabajo dentro de dicho dispositivo (sección dos), misma que está destinada al aprovechamiento de la dinámica del coagulante y las burbujas provocadas por las reacciones plasmadas en la Ecuación 1 y Ecuación 2; posteriormente en la sección nueve, se observa un desnatador, el cual es utilizado para la separación del contaminante. Parte del agua problema es recirculada para optimizar la remoción del contaminante en cuestión.



**Figura 3. Reactor tipo batch para la implementación de electro flotación. (1) sección descendente; (2) sección ascendente; (3) sondas de conductividad; (4) conductímetro; (5) panel de terminales de entrada/salida; (6) cableado; (7) sistema de procesamiento de datos; (8) electrodos; (9) desnatador; (10) burbujas generadas electroquímicamente (modificado de Essadki et al., 2008).**

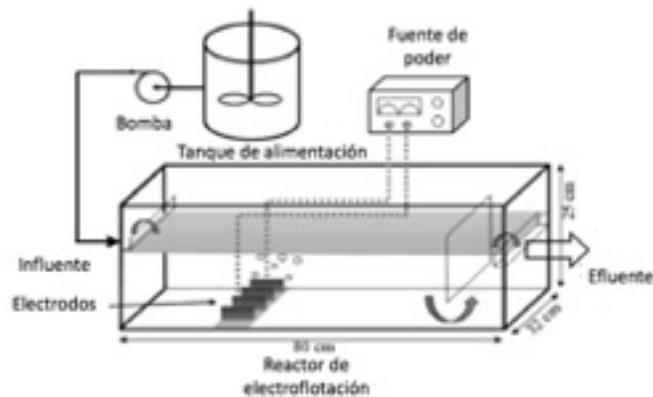
Hossein *et al.* (2011) propusieron un reactor de flujo continuo, dividido por tres secciones: (1) donde se realizan los procesos electroquímicos de electrocoagulación; (2) donde se llevan a cabo los procesos de separación de contaminantes por medio de flotación; (3) donde se eliminan los contaminantes

por sedimentación (ver Figura 4). En este estudio, los resultados concluyen que en un reactor de ECF, es importante destinar un apartado para la acumulación de la espuma y los lodos generados y de esta manera evitar el arrastre de los mismos al efluente.



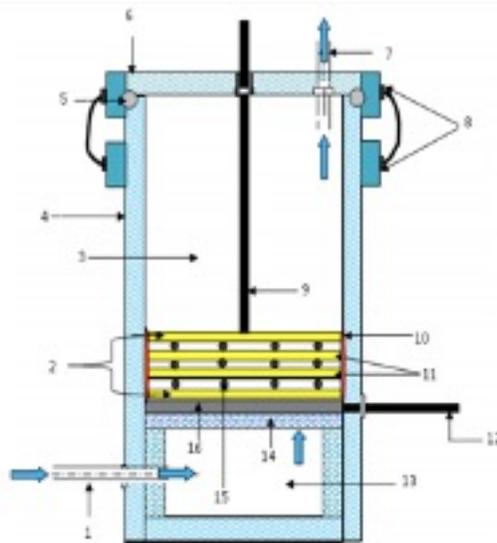
*Figura 4. Reactor de flujo continuo para la implementación de electrocoagulación-flotación (modificado de Hossein et al., 2011).*

Existen estudios más recientes que contemplan el tiempo de residencia hidráulico (TRH) como parte fundamental en el proceso de remoción de un contaminante por medio de ECF. En 2019, Motashami y Shang implementaron un reactor con una amplia distancia de separación entre los electrodos y el efluente, con el objetivo de generar un TRH de 8 minutos y prolongar la interacción entre flocs y burbujas, optimizando así la remoción del contaminante (ver Figura 5). En dicho estudio el contaminante en cuestión fue pintura automotriz, evaluada como sólidos suspendidos totales (SST), alcanzando una remoción del 95%.



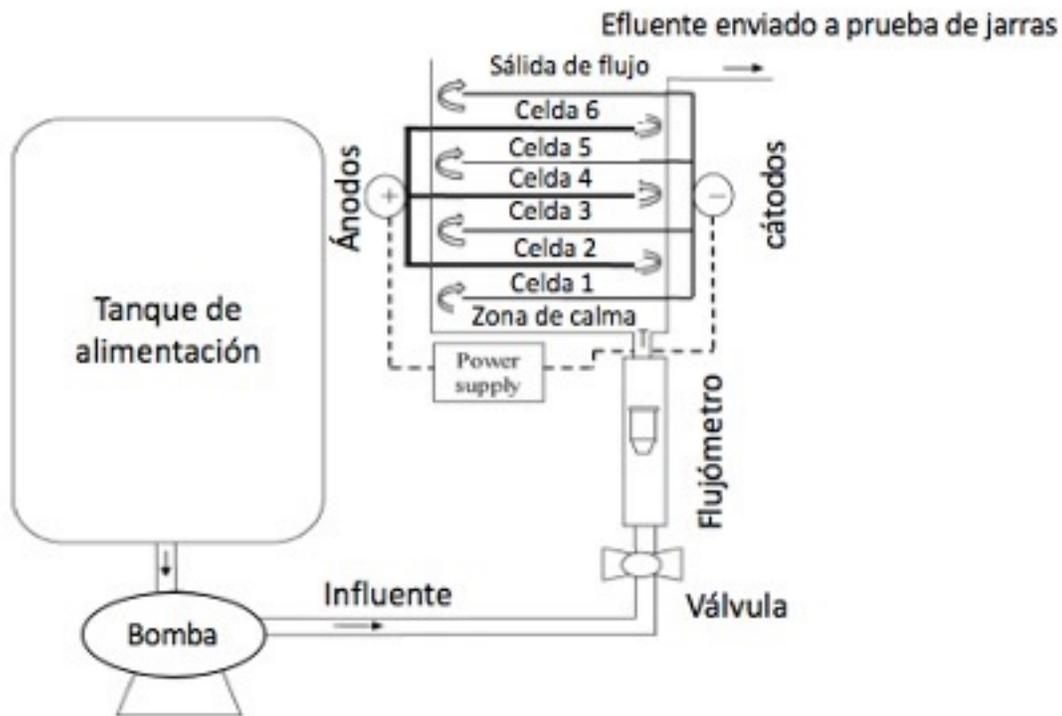
**Figura 5. Reactor de flujo continuo dedicado a ampliar el TRH (modificado de Motashami & Shang, 2018).**

Un estudio reciente de Tchamango y Darchen (2018) generó mayor turbulencia bajo la implementación de un dispositivo de flujo continuo en forma de torre, con electrodos perforados colocados de forma horizontal. La perforación de las placas generó un flujo desordenado y turbulento, mejorando las condiciones de mezclado dentro del sistema (ver Figura 6).



**Figura 6. Distribución del reactor de electrocoagulación: (1) Influyente; (2) Pila de electrodos; (3) Zona de coagulación-floculación; (4) Paredes del reactor; (5) Seguro de tapa de reactor; (6) Tapa de reactor; (7) Efluente; (8) Sistema de cierre de reactor; (9) Electrodo de grafito utilizado como contacto eléctrico entre electrodo de hierro y la fuente de poder; (10) Cojín que permite el sellado de los electrodos con las paredes del reactor; (11) Electrodos bipolares de hierro; (12) Contacto eléctrico de grafito con los electrodos de hierro; (13) Zona de estabilización de flujo antes de entrar al contacto con los electrodos; (14) Placa perforada de PVC que soporta a los electrodos ; (15) Separador entre electrodos bipolares; (16) Terminal del electrodo de grafito. (tomado de Tchamango y Darchen, 2018).**

López *et al.* (2019) propusieron un reactor de flujo ascendente compuesto por una pila de electrodos, colocados de tal manera que provocaran un serpentin en el flujo. Este serpentin propiciaba un mayor TRH, favoreciendo la hidrodinámica del sistema y optimizando el proceso de electrocoagulación/flotación (ver Figura 7).



*Figura 7. Reactor con electrodos colocados de manera horizontal (tomado de López et al., 2019).*

Con base en los diferentes estudios mostrados, se puede concluir que es importante valorar el desempeño de la tecnología en tres aspectos:

1. Técnico. Conocer que tan hábil y versátil es dicho sistema para realizar la remoción del contaminante en cuestión y visualizar los alcances de este.
2. Económico. Conocer si el presupuesto que demanda la tecnología es competente en el mercado en comparación con sus similares, y si se adapta al contexto económico disponible.
3. Ambiental. Asegurar que el sistema no genere subproductos que puedan ser nocivos para la salud humana.

Según las referencias citadas, la eficiencia de un proceso de ECF depende de factores fisicoquímicos, electroquímicos, hidráulicos y de configuración, sin embargo, en lo referente a la remoción de microalgas, la literatura actual carece de:

- Enfoque extrapolable: La aplicación de un sistema de ECF para la remoción de microalgas debe probarse, lo más posible, bajo condiciones que se asemejen a un contexto real. Por ello, en este trabajo de investigación se propone trabajar con concentraciones de microalgas similares a las presentes en un cuerpo de agua natural.
- Enfoque de configuración específica: A pesar de la existencia de reactores de distintas estructuras físicas, la literatura actual carece de dispositivos que evalúen específicamente la variación de las condiciones hidrodinámicas a través de la modificación de las características físicas dentro del reactor, por ello, en este trabajo de investigación se propone valorar el efecto que tienen distintas alturas libres sobre electrodos, en la remoción de las microalgas.

Ambas aportaciones se postularon con la intención de contribuir al conocimiento, y estudiarlas en conjunto con factores previamente analizados en la literatura, con el objetivo de valorar el desempeño técnico, económico y ambiental de un reactor de ECF y, en el mejor de los casos, encontrar las mejores condiciones en los tres rubros. De lograrse esto, la tecnología sería atractiva para ser utilizada como proceso de potabilización en un contexto real.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la factibilidad técnica y económica del uso de un sistema de electrocoagulación/flotación para la remoción de microalgas con fines de potabilización.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer la remoción de microalgas mediante un sistema que combine la electrocoagulación y la electroflotación.
- Identificar los factores hidráulicos, fisicoquímicos y electroquímicos involucrados en los procesos de electrocoagulación y electroflotación (densidad de corriente, posicionamiento de electrodos dentro del reactor, dosis de coagulante, concentración de clorofila-a y pH en el sistema), que favorecen la remoción de microalgas.
- Definir los costos de operación del sistema de electrocoagulación/flotación en el proceso de remoción de microalgas, mediante la exposición y evaluación de los componentes del sistema bajo las mejores condiciones de operación.
- Fundamentar la posible aplicación del método de electrocoagulación/flotación en el proceso de remoción de microalgas con fines de potabilización.
- Determinar si el sistema propuesto cumple con la normatividad aplicable en materia de salud (NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización).

### **4 HIPÓTESIS**

La remoción de microalgas puede llevarse a cabo de manera eficiente, por medio de electrocoagulación/flotación (ECF) con fines de potabilización, en comparación con la coagulación química convencional (CQ).

## 5 MARCO TEÓRICO

### 5.1 MICROALGAS

#### 5.1.1 Generalidades

Las microalgas son organismos pertenecientes al fitoplancton acuático, cuentan con un tamaño de entre 3 y 30  $\mu\text{m}$  y son consideradas como microorganismos eucariontes (núcleo rodeado por membrana). Son capaces de generar oxígeno y reproducirse a partir de la captación de luz y  $\text{CO}_2$ , además de producir pigmentos de clorofila. Aproximadamente el 50% de las actividades fotosintéticas en el planeta son provenientes de las microalgas (Valeriano, 2018).

La mayoría de las especies de microalgas son de vida libre, encontrándose principalmente en ambientes acuáticos continentales y marinos; aunque también habitan los terrestres. Estas se dividen por grupos y cada grupo se reconoce por su habilidad para establecerse en ambientes extremos, habitando sistemas híper salinos, aguas termales (hasta  $80^\circ\text{C}$ ) e incluso regiones polares a varios grados bajo cero. Tienen la habilidad de sobrevivir a largos periodos de desecación y algunas especies producen una vaina pigmentaria externa que les permite sobrevivir en ambientes de alta radiación UV (Almaral, 2011).

Comúnmente las poblaciones de microalgas están acompañadas por el desarrollo de organismos de menor complejidad molecular, pero con las mismas capacidades fotosintéticas de las microalgas, llamadas cianobacterias. Estas cuentan con un tamaño aproximado entre 0.2 y 2  $\mu\text{m}$ , y pertenecen a una clasificación procariota (su núcleo no está rodeado por una membrana). A las cianobacterias anteriormente se les conocía como algas verdeazuladas o cianofitas, sin embargo, los especialistas en ficología han preferido denominarles cianoprocariontes para diferenciarlas del resto de las bacterias.

Algunas especies de cianobacterias contienen dentro de su composición estructuras proteicas o vacuolas llenas de gas. Las vacuolas están envueltas con una capa impermeable al agua, pero permeable a los gases, por lo que la composición y concentración de gas dentro de la vesícula dependen del existente en el medio; dichas vacuolas son las causantes de una baja densidad en las células, lo que provoca una tendencia a flotar de las mismas (Guamán y González, 2016).

Tanto las microalgas como las cianobacterias son organismos bastante versátiles:

- Capaces de duplicar su biomasa en 24 horas.
- Para su crecimiento requieren únicamente luz solar y nutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo).
- No son dependientes de un suelo fértil.
- Pueden sobrevivir en un ambiente a bajas temperaturas, ambientes ácidos y con poca concentración de nutrientes (Dávila, 2016).

- Tienen a tener una alta repulsión eléctrica en relación con las demás partículas presentes en el medio, lo que favorece su permanencia en suspensión. Tienen una carga superficial negativa (Valeriano, 2018).
- Su potencial Z está entre -2 y 0.75 mV y es función de los grupos funcionales químicos presentes en la pared celular, las condiciones del cultivo, la edad del cultivo y la especie.
- A partir de valores de pH entre 4 y 5, los grupos funcionales presentes en la periferia de la célula se disocian, cargándose negativamente (Valeriano, 2018).

Las microalgas y las cianobacterias están compuestas por macromoléculas como carbohidratos, lípidos y proteínas; las dos presentan *clorofila-a*, pigmento que le da un color verde al agua que las contiene, sin embargo, este pigmento puede degradarse a *feofitina*, dependiendo de su senectud o de que tan ácido sea el ambiente en el que se encuentren (Bravo y Tomasini 2017).

Existen estudios enfocados en la remoción específica de microalgas por medio de electrocoagulación-flotación (Parmentier *et al.*, 2020; Goltzary *et al.*, 2015), y otros tantos específicamente en la remoción de cianobacterias (An *et al.*, 2019; De la Fuente *et al.*, 2019), sin embargo, existen autores que consideran a las microalgas y cianobacterias como un solo consorcio microalgal como objeto de estudio (Landels *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2011). Este último enfoque es el adoptado por el presente trabajo de investigación.

### 5.1.2 Problemas que generan las microalgas

La eutrofización del medio acuático, provocado por la presencia de nitrógeno y fósforo, puede provocar un crecimiento masivo de las microalgas. Este crecimiento puede estar constituido por una o más especies (que pueden ser de carácter tóxico) y es llamado “floración microalgal” o “bloom algal”. Este fenómeno puede desencadenarse en pocas horas o varios días, y puede permanecer por períodos prolongados. En muchos casos las floraciones se reconocen a simple vista, porque el agua se colorea con tonalidades azul-verdoso, rojizo o negruzco (Ministerio de la salud de la nación, 2011), sin embargo, existen compuestos orgánicos volátiles, como la geosmina y el MIB (2-metilisoborneol), que advierten la presencia de florecimientos microalgales debido al olor (a tierra mojada y moho) y sabor que estos provocan en el agua, incluso a bajas concentraciones (del orden de 10 ng/L); dichos compuestos no suelen ser removidos por un tren de tratamiento de agua potable convencional, lo que provoca molestias en los consumidores incluso en agua potabilizada (Zat & Benetti, 2010 ; Guadayol, Cortina, Guadayol, & Caixach, 2015; Castro, 2013; Yañez *et al.*, 2009).

Además del exceso de nutrientes, existen condiciones que favorecen el establecimiento y proliferación de las microalgas: temperatura elevada, buena disponibilidad lumínica, baja turbulencia, ausencia de vientos, tiempo de residencia elevado en el cuerpo de agua y dinámica interna de los nutrientes.

Estas condiciones varían en los cuerpos de agua utilizados para su potabilización (Guamán & González, 2016).

A continuación, se presentan algunos problemas causados por la proliferación de microalgas en los cuerpos de agua.

#### **5.1.2.1 Anoxia en el medio**

Un florecimiento microalgal puede causar condiciones de anoxia. Un exceso de nutrientes genera una mayor producción de biomasa microalgal, esta biomasa en descomposición es metabolizada por bacterias que requieren del oxígeno disuelto en el medio para llevar a cabo su digestión, lo que ocasiona ambientes de hipoxia o incluso anoxia en el agua (Jacob *et al.*, 2014; Barsanti y Gualtieri, 2014).

#### **5.1.2.2 Toxicidad**

El bloom trae consigo un riesgo en potencia a la salud humana y a las demás especies que interactúen en el medio contaminado, debido al florecimiento de algunas especies de microalgas de carácter tóxico. Ciertas floraciones son acompañadas por la síntesis y liberación de compuestos tóxicos que reciben el nombre de *cianotoxinas* (Barrado, 2016).

Las cianotoxinas (CTX), una vez sintetizadas, permanecen en el interior de la célula productora. En un ambiente natural, gran parte de la liberación de estas toxinas al medio se produce durante la senescencia, muerte y lisis de las células; entre un 10 y 20% de las toxinas celulares se liberan al medio en la fase de crecimiento de un cultivo. Cuando llegan a la fase estacionaria, aumenta la mortalidad de células y, por ende, la concentración de toxinas solubles. En el ambiente, una vez que las CTX son liberadas al agua, los mecanismos que determinan su destino final pueden ser: la dilución con agua no contaminada; la degradación química directa; la absorción en los sedimentos en los sólidos suspendidos o en la materia orgánica disuelta; la degradación por fotólisis indirecta en presencia de sustancias húmicas y/o pigmentos; la degradación por bacterias acuáticas y la bioacumulación (Ministerio de salud de la Nación, 2011).

Existen diferentes tipos de metabolitos o CTX que pueden causar una afectación directa a los organismos presentes en el medio, sin embargo, las microcistinas son una de las principales cianotoxinas capaces de interactuar con el ser humano mediante la ingesta de agua. Esta interacción puede provocar: fiebre, dolores de cabeza, dolor muscular y articular, ampollas, calambres estomacales, diarrea, vómitos, úlceras bucales y reacciones alérgicas; en algunos casos convulsiones, insuficiencia hepática y (rara vez) puede ocasionar la muerte (Roset *et al.*, 2001).

La Organización Mundial de la Salud ha establecido como una concentración de ingesta diaria tolerable 1 µg/L, considerando a una persona adulta de 60 kg, lo que se traduce en 0.04 µg por cada kg de peso del adulto (Sengül *et al.*, 2016; OMS, 2011).

Existen registros que reportan que las primeras intoxicaciones de poblaciones humanas por el consumo de agua contaminada por cepas tóxicas de microalgas fueron encontradas en Australia, Inglaterra, China y África del Sur. No todas las cepas de microalgas llegan a ser tóxicas, de hecho, en una misma especie pueden encontrarse cepas productoras y no productoras de estos metabolitos. Se estima que el 50% de las floraciones microalgales en aguas a nivel mundial son tóxicas. Existen toxinas capaces de afectar el sistema neuronal como las neurotoxinas, el hígado (hepatoxinas) y existen las endotoxinas que afectan el sistema inmunológico y cardiovascular (Roset *et al.*, 2001).

### **5.1.2.3 Afectaciones en un proceso de potabilización**

Un proceso de potabilización convencional para aguas superficiales suele contar con las etapas de cribado, coagulación/floculación, sedimentación, filtración y desinfección (Barrado 2016); la presencia de microalgas en el influente puede provocar:

- Obstrucción de los procesos de filtración (granulares o de membranas).
- Reducción del tiempo de duración de las corridas de filtración por obstrucción del medio.
- Incremento de la demanda de agua para el retrolavado de los filtros.
- Incremento de la dosis de coagulante para su remoción.
- Aumento de los parámetros de color y turbiedad.
- Generación de olores y sabores indeseables al agua.
- Producción de cianotoxinas.
- Aumento de la probabilidad de renacimiento microbiano en los sistemas de distribución de agua potable.
- Aumento del pH, afectando la coagulación.

### **5.1.3 Clorofila-a**

La clorofila es el pigmento fotosintético presente en todas las plantas. Existen tres tipos: a, b y c. La clorofila-a (Cl-a) es el pigmento verde presente en todas las algas fitoplanctónicas; su determinación por medio de espectrofotometría es una de las técnicas indirectas más utilizadas para la conocer la concentración y estado fisiológico de las mismas, debido a que, bajo este procedimiento, es posible detectar los niveles de clorofila-a (pigmento que refleja un adecuado estado fisiológico de las microalgas) y los niveles de feofitina-a (pigmento amarillento producto de la degradación de la clorofila-a). El deterioro de estos microorganismos genera la degradación de su color y esto puede deberse a la falta de nutrientes, radiación u oxígeno en el medio (Bravo y Tomasini, 2017; Chen y Posten, 2016; Walker, 2015; Barsanti y Gualtieri, 2014; Rivera *et al.*, 2005). Al igual que ciertos autores, en este trabajo de investigación se utilizó la Cl-a como indicador de la presencia de microalgas en el medio (Gao *et al.*, 2010; Bravo y Tomasini, 2017; Sok *et al.*, 2019).

### 5.1.4 Índice de Carlson

Una de las causas principales del desarrollo del bloom microalgal, es el exceso de nutrientes en el medio acuático (eutrofización), provocado por distintas situaciones en los cuerpos de agua:

- Descargas de aguas residuales.
- Uso excesivo de fertilizantes en zonas aledañas.
- Deforestación y erosión de suelos agrícolas.

El nivel de eutrofización de un cuerpo de agua puede ser evaluado en una escala del 1 al 100, por medio del índice de estado trófico (IET) o TSI por sus siglas en inglés (Trophic State Index), propuesto por Robert E. Carlson en 1977, donde se clasifica un cuerpo de agua en oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipertrófico, dependiendo de la cantidad de nutrientes presentes. El IET puede calcularse por medio de la aplicación de expresiones matemáticas, a partir de la estimación de cualquiera de los siguientes parámetros: transparencia del cuerpo de agua, fósforo total y clorofila-a (ver Tabla 2).

**Tabla 2. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua. (modificado de Moreno, 2010).**

Estado de eutrofia	IET	Transparencia (m)	Fósforo total (mg/m <sup>3</sup> )	Clorofila-a (mg/m <sup>3</sup> )
Oligotrófico	0	64	0.75	0.04
	10	32	1.5	0.12
	20	16	3	0.34
	30	8	6	0.94
Mesotrófico	40	4	12	2.6
	50	2	24	6.4
	60	1	48	20
Eutrófico	70	0.5	96	56
	80	0.25	192	154
	90	0.12	384	427
Hipertrófico	100	0.06	768	1182

En este trabajo de investigación se utilizó este indicador, a razón de conocer qué nivel de contaminación representan las concentraciones de clorofila-a desarrolladas y de esta manera simular un contexto real a escala laboratorio, contrastando los niveles obtenidos con los presentes en los diferentes cuerpos de agua en México.

El cálculo del TSI, a partir la estimación de clorofila, puede realizarse de acuerdo con la Ecuación 3.

$$TSI_{Cl-a} = 9.81Ln(Cl - a) + 30.6$$

Ecuación 3

## 5.1.5 Factores involucrados en la generación de un cultivo de microalgas

### 5.1.5.1 Nutrientes

La biomasa microalgal está compuesta por  $CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}$  (Jacob *et al.*, 2018). Las microalgas son capaces de sintetizar proteínas, carbohidratos, ácido nucleico, vitaminas y lípidos, por lo tanto, se necesitan elementos básicos para su crecimiento, tales como carbono, nitrógeno y fósforo. Un nutriente limitante es aquel que, en ausencia, genera un desarrollo pobre en las microalgas, incluso cuando los demás se encuentren en abundancia (Barsante y Gualtieri, 2014); el carbono es el elemento limitante para su crecimiento. Su aprovechamiento puede realizarse por medio de compuestos químicos inorgánicos como dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y bicarbonatos ( $HCO_3^-$ ), y en algunas ocasiones, moléculas orgánicas como azúcares y alcoholes. Además del carbono, el nitrógeno puede ser un nutriente limitante en el crecimiento de las microalgas, este elemento es aprovechado como nitratos, sin embargo, ciertos tipos logran aprovechar el nitrógeno como amonio y/o urea. Algunas microalgas (*Chlorella*) son capaces de metabolizar metales y algunos xenobióticos para su desarrollo (Jacob *et al.*, 2018).

### 5.1.5.2 pH

En un cultivo de microalgas, un pH común está entre 7 y 9 (aunque existen especies capaces de vivir en ambientes más ácidos o básicos). Un pH demasiado básico es capaz de ser regulado por medio del aumento de la aireación del medio para obtener una mayor dilución de dióxido de carbono (Jacob *et al.*, 2014; Barsanti y Gualtieri, 2014). Un aumento del pH por encima de 9 puede provocar la disminución del nitrógeno aprovechable por las microalgas, esto debido a que, al incrementar el pH, el nitrógeno presente como amonio es transformado a amoníaco y es liberado a la atmósfera.

Desde un punto de vista celular, el pH puede afectar el potencial Z de las microalgas. Las células microalgales están compuestas por ácidos grasos en la periferia de sus células, estos ácidos grasos tienden a liberar o ceder protones ( $H^+$ ) a pH arriba de 2-3, esto genera la carga negativa en ellas y se vuelven candidatas a reaccionar con los productos coagulantes (Chew *et al.*, 2019; Walker, 2015). En la Figura 8 se puede apreciar la relevancia del pH sobre el potencial Z de dos especies de microalgas.

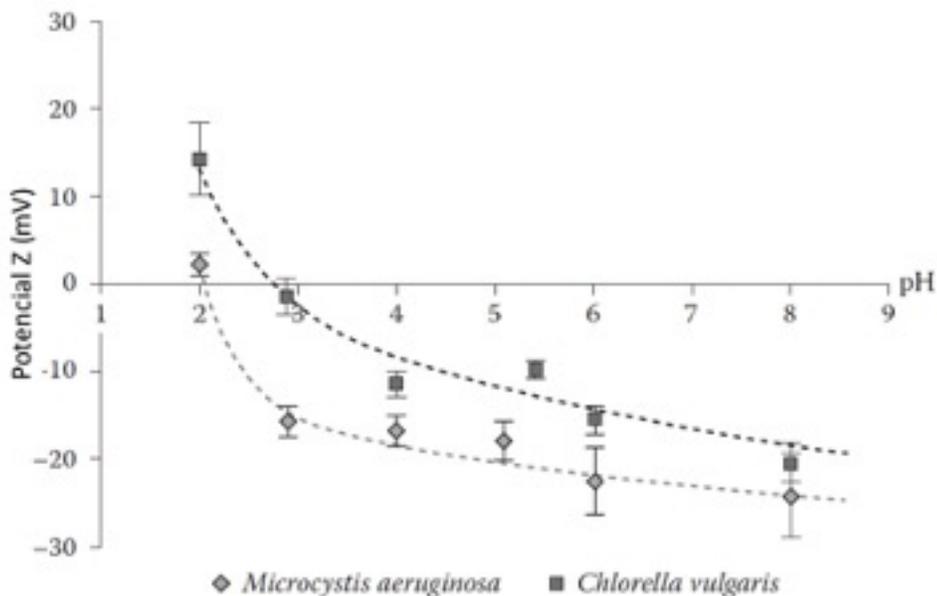
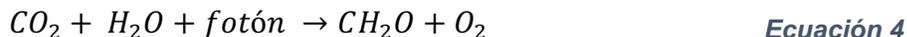


Figura 8. Potencial Z de *Microcystis* y *Chlorella vulgaris* como función del pH (Walker, 2015).

### 5.1.5.3 Intensidad de luz

La fotosíntesis es el proceso mediante el cual, ciertos organismos obtienen energía debido a la fijación de fotones para metabolizar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y transformarlo en azúcares, liberando oxígeno a la atmósfera (O<sub>2</sub>). El proceso general de la fotosíntesis es representado por la siguiente reacción plasmada en la Ecuación 4:



Al tratarse de organismos fotosintéticos, las microalgas dependen en gran medida de la energía lumínica y la trayectoria de esta. Un cultivo de microalgas puede ser iluminado por luz artificial, luz solar o en algunas ocasiones, ambas. Sin embargo, en un cultivo microalgal existe un fenómeno llamado “fotoinhibición”; cuando un cultivo de microalgas recibe una cantidad óptima de radiación, estas llegan a reproducirse en un punto máximo, lo cual genera una alta densidad celular en la superficie, provocando sombra en la parte baja de la columna de agua y generando la muerte de los organismos en el fondo debido a la ausencia de luz. Es por ello que, en el diseño de cultivos a cielo abierto, se recomienda utilizar tirantes de agua de entre 10 y 30 cm (Hernández y Labbé, 2014; Benavente *et al.*, 2012; Contreras *et al.*, 2003).

#### **5.1.5.4 Temperatura**

La temperatura óptima para el desarrollo de microalgas está entre 25 y 35 °C (Barsanti y Gualtieri, 2014; Chen y Posten, 2016; Jacob *et al.*, 2015), sin embargo, existen ciertas especies capaces de tolerar temperaturas extremas de hasta 16 °C (Jacob *et al.*, 2018), en este caso, las temperaturas generan un crecimiento lento en las células microalgales.

#### **5.1.5.5 Mezclado del cultivo**

De acuerdo con diversos autores, un factor importante en el cultivo de microalgas es un adecuado mezclado, favoreciendo la interacción con los nutrientes, el CO<sub>2</sub> y la radiación. En el mezclado deben evitarse altos esfuerzos de corte e intensos movimientos mecánicos que puedan dañar a las células algales (Barsanti y Gualtieri, 2014; Benavente *et al.*, 2012; Contreras *et al.*, 2003; Hernández y Labbé, 2014). Es por ello que, como alternativa para su mezclado, se pueden utilizar: aireación por burbujeo, paletas rotatorias o incluso mezclado manual suave por lo menos una vez al día (Barsanti y Garitera, 2014).

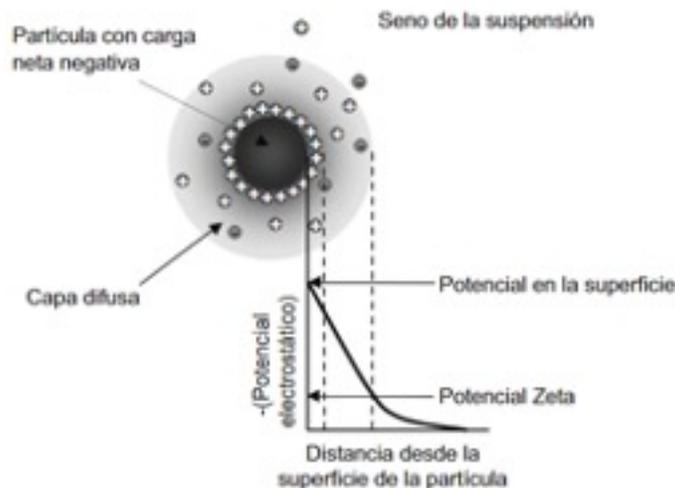
## **5.2 CLARIFICACIÓN DEL AGUA**

### **5.2.1 Coagulación**

Comúnmente la turbiedad y el color en el agua pueden ser generados por la presencia de partículas en suspensión. Estas partículas pueden ser de diferentes orígenes, tamaños, concentraciones y naturaleza química.

En una partícula coloidal cargada negativamente, existen dos capas que la rodean: la capa de Stern y la capa difusa. La capa de Stern (o capa fija) está formada por cationes que rodean a la partícula, disminuyendo su potencial eléctrico (en el caso de la coagulación, esto se logra mediante la adición de un agente coagulante). La capa difusa es una mezcla de cationes y aniones que se extienden desde la capa de Stern hacia la fase líquida. A la capa de Stern y a la difusa juntas se les llama “doble capa eléctrica” (ver Figura 9).

En un proceso de coagulación convencional se utilizan productos químicos o naturales como coagulantes. Al adicionarlos al agua promueven una desestabilización eléctrica de las partículas coloidales, lo que conlleva a la formación de conglomerados entre coloides y coagulante, denominados flocs. El coagulante más utilizado por su disponibilidad y menor costo es el sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>).



**Figura 9. Fuerzas de interacción que actúan sobre una partícula en suspensión (tomado de Pablo Cañizares, 2008)**

Los coloides pueden ser desestabilizados mediante los siguientes mecanismos de coagulación:

- **Compresión de la doble capa eléctrica.** En este mecanismo, la adición de coagulante provoca la disminución del espesor de la doble capa eléctrica al aumentar la concentración de cationes en la misma.
- **Neutralización.** La desestabilización por neutralización involucra la reducción de la carga superficial neta de las partículas en suspensión por adsorción de iones o polímeros de carga opuesta. En este mecanismo se describe la interacción coloide-coagulante. El coagulante puede ser un polímero o una sal metálica.
- **Barrido.** Cuando la sal metálica ya se encuentra como precipitado (hidróxido de aluminio en el caso de las sales de aluminio), barren las partículas coloidales, promoviendo su sedimentación. Este mecanismo toma parte cuando la concentración de los coloides es baja (Hendricks, 2011), o en su defecto, cuando la concentración de coagulante agregado es mayor que los coloides en solución (Rivera *et al.*, 2006).
- **Puente Interparticular.** Existen polímeros naturales o sintéticos de cadena larga que pueden funcionar como los responsables de la desestabilización de las partículas. En este mecanismo, parte de la cadena del polímero puede unirse o adsorberse a una segunda molécula, formando un puente entre ellos (Hendricks, 2011).

### 5.2.2 Floculación

La floculación es la operación unitaria en la que los flocs formados durante la coagulación, aumentan de tamaño debido a las colisiones generadas por agitación mecánica o hidráulica.

La colisión entre partículas suspendidas ocurre por tres mecanismos de transporte:

- Floculación pericinética o difusión Browniana. Esta se debe a la energía térmica del líquido; al cambiar la temperatura varía la viscosidad y la energía cinética de las partículas coloidales, provocando un cambio en la velocidad de sus colisiones. Si la temperatura es igual a 0 °, este mecanismo no se llevará a cabo. En este tipo de mecanismos se aglomeran partículas menores a 1 micra.
- Floculación ortocinética. Este mecanismo es producido por la masa de agua en movimiento. A diferencia de la floculación pericinética, este proceso es capaz de involucrar partículas mayores a una micra. Entre más agitación exista, mayor será la tasa de colisión entre flóculos.
- Floculación diferencial. En este proceso, las partículas grandes arrastran a las más pequeñas; mientras más diferencia exista entre el tamaño de las partículas, mayor será la aglomeración. A mayor gravedad específica de la partícula y menor viscosidad cinemática del agua, será mayor la colisión entre partículas.

Un buen proceso de floculación forma aglomerados de mayor densidad y dureza, favoreciendo su remoción por sedimentación. La cantidad de flóculos formados depende de la cantidad de colisiones entre partículas. Al provocar la colisión de partículas es probable que:

- Choquen y se aglomeren.
- Choquen y no se aglomeren
- Colisionen y se rompan

En el proceso de floculación existen dos factores indispensables:

- 1) Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ ). Este se refiere a la energía de agitación impartida al agua para generar colisiones entre las partículas y su aglomeración (esta es función de la potencia de agitación, volumen de agua y su viscosidad)
- 2) Tiempo de retención (min). Se describe como el tiempo que permanece el agua en agitación en el tanque de floculación.

En la Tabla 3 se describen los valores recomendados para un proceso de floculación eficiente, aplicado a diferentes operaciones unitarias (Hendricks, 2011).

**Tabla 3. Valores de gradientes de velocidad y tiempo de retención recomendados por la literatura para optimizar el proceso de floculación (tomado de Hendricks, 2011).**

Factor	Operación unitaria	Rango
Gradiente de velocidad	Clarificación convencional	20 a 80 s <sup>-1</sup>
	Flotación	60 a 70 s <sup>-1</sup>
	Interconexión al sedimentador	<20 s <sup>-1</sup>
Tiempo de retención	Clarificación convencional	15 a 20 minutos
	Flotación	25-20 minutos

Un aumento en el gradiente de velocidad es directamente proporcional a la tasa de colisión entre las partículas. El tiempo de retención está estrechamente relacionado con la cantidad de colisiones entre los coloides; un mayor tiempo de retención puede favorecer el aumento de tamaño de los flocs generados, sin embargo, flocs demasiado grandes tienden a ser más propensos a romperse, por ello, en un proceso de floculación es recomendable disminuir gradualmente los gradientes de velocidad una vez que los flocs alcancen un tamaño adecuado. Normalmente los gradientes de velocidad recomendados en un proceso de floculación convencional son de 80, 60, 40 y 20 s<sup>-1</sup> (Tchobanoglous *et al.*, 2012).

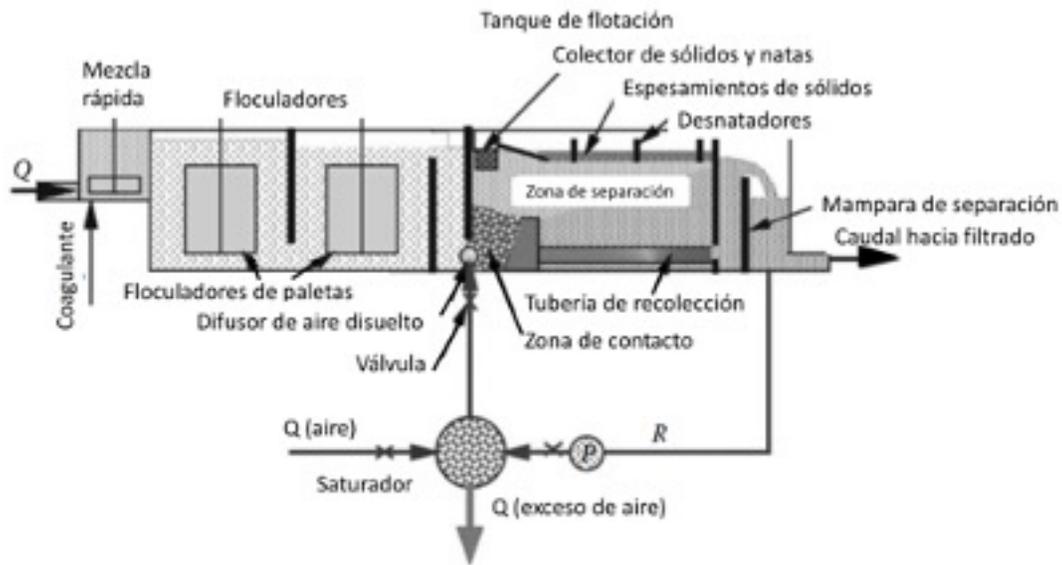
Una manera de generar flocs más resistentes, es agregando un polímero al líquido.

### 5.2.3 Flotación

La flotación es el proceso de clarificación del agua en el que un contaminante es llevado a la superficie por medio de burbujas generadas dentro de la fase líquida. Este proceso es consecuente de la coagulación y floculación (ver Figura 10). En un proceso de flotación, una corriente con flocs previamente formados, choca e interactúa con una corriente de burbujas, las cuales al colisionar forman aglomerados flocs-burbuja que son llevados a la superficie; esto a través de la interacción de cargas entre los flocs (carga positiva) y las burbujas (carga negativa).

A diferencia de la sedimentación, en donde lo ideal es la obtención de flocs de mayor tamaño y densidad, en flotación se requieren flocs de menor tamaño ( $\leq 50\mu\text{m}$ ), facilitando su flotación. Basta con un adecuado mezclado para obtener flocs de dimensiones ideales, utilizando gradientes de velocidad entre 60 y 80 s<sup>-1</sup> (Hendricks, 2011). Un adecuado mezclado depende de la cantidad de burbujas presentes, el tamaño de estas y su velocidad de ascenso.

Burbujas de menor tamaño generan mayor turbulencia en el agua y por ende mejor mezclado, además, su velocidad de ascenso es menor, lo que aumenta el tiempo de contacto entre los flocs y las burbujas.



*Figura 10. Vista lateral de un proceso de clarificación por flotación (tomado de Hendricks, 2011).*

## 5.3 ELECTROQUÍMICA

### 5.3.1 Principios de electricidad

#### 5.3.1.1 Voltaje

La fuerza que obliga a los electrones a circular por un conductor depende de la diferencia de electrones existentes en los extremos de este; la tendencia natural es que se produzca una circulación de electrones hacia el extremo donde existe la ausencia de los mismos, para alcanzar así un equilibrio (Fowler y Richard, 2000).

La diferencia existente en el número de electrones entre un extremo y otro, y que determina la “fuerza” con la que circulan, recibe el nombre de diferencia de tensión (también voltaje); cuanta mayor tensión exista en los extremos de un conductor, mayor es el número de electrones que hay dispuestos en un lado para desplazarse hacia el otro (Donante, 2010). Un mayor voltaje, conlleva a un mayor flujo de electrones.

#### 5.3.1.2 Corriente eléctrica

La corriente eléctrica es el flujo uniforme de electrones que recorre el cuerpo de un conductor en específico; es decir, es la razón de cambio de los electrones con respecto al tiempo. La corriente es medida en amperios (A) (Guerrero y Candelo, 2011).

Por convención se ha definido que la magnitud de la corriente es positiva para un sentido de flujo contrario al de los electrones.

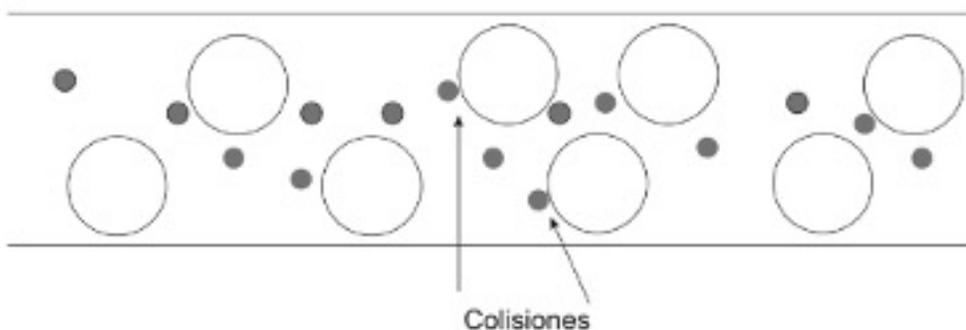
Para que pueda existir una corriente es necesaria la excitación en los electrones, además de una trayectoria cerrada por la cual fluirán. Según la literatura existen dos tipos de corrientes:

- Corriente directa. Corriente cuyo sentido es constante en el tiempo.
- Corriente alterna. Corriente cuyo sentido cambia constantemente.

### 5.3.1.3 Resistencia eléctrica

La propiedad intrínseca de un material a oponer resistencia al flujo de electrones que atraviesan por él se denomina resistencia eléctrica y se debe a factores como: longitud del conductor, sección transversal al flujo de electrones y material con el que esté fabricado. El flujo de electrones recorre el material conductor con mayor facilidad cuando la sección transversal al mismo es mayor; esto debido a que los electrones disminuyen su probabilidad de colisionar con los átomos del material conductor, disminuyendo su resistencia a fluir. Las colisiones entre electrones y átomos producen la disipación de energía en forma de calor. Por otro lado, mayor longitud del material conductor se traduce en una mayor tasa de colisiones y por ende un valor de resistencia mayor (ver Figura 11).

La unidad que mide la resistencia eléctrica es el ohmio ( $\Omega$ ).



*Figura 11. Electrones en colisión con los átomos del material conductor (Guerrero & Candelo, 2011).*

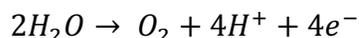
### 5.3.2 Reacciones Redox

Las reacciones de oxidación-reducción (Redox) son las encargadas de generar un flujo de electrones entre dos especies químicas; cuando una de estas dos especies pierde electrones se dice que se oxida, por el contrario, la especie que los gana se reduce (Schüring *et al.*, 2000).

Ejemplificando las reacciones Redox en un proceso de electrocoagulación-flotación, utilizando electrodos de aluminio, se obtienen las reacciones plasmadas

en la Ecuación 1 y Ecuación 2; sin embargo, cuando el potencial así lo permite, es posible obtener una tercera reacción, tal y como se muestra en la Ecuación 5.

Reacción de oxidación en el ánodo:



*Ecuación 5*

La reacción de oxidación y la reacción de reducción ocurren al mismo tiempo; no es posible que ocurra una sin la otra. Los electrones que se pierden en la reacción de oxidación son ganados por la especie que se reduce (Gao *et al.*, 2010).

### 5.3.3 Celdas electrolíticas

Una celda electroquímica es un sistema constituido por dos fases, una fase líquida y una fase sólida. La fase líquida está conformada por una solución electrolítica, mientras que la fase sólida lo está por los electrodos. La interacción de ambas fases forma un circuito eléctrico.

Existen dos tipos de celdas electroquímicas: Las galvánicas y las electrolíticas.

En la celda galvánica (o voltaica), a partir de reacciones químicas espontáneas en los electrodos, se produce una diferencia de potencial en el medio, generando energía eléctrica.

Por otro lado, para que una celda electrolítica pueda llevar a cabo una reacción deseada, es necesario aplicar cierta energía al sistema mediante el uso de una fuente de poder externa. El movimiento de los electrones a través del sistema se favorece al imponer una diferencia de potencial entre dos electrodos (ánodos y cátodo), lo que provoca transferencia de electrones en la interfaz sólido-líquido (Barrera, 2014).

### 5.3.4 Electrodo

Un electrodo es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con la fase líquida del circuito. El cátodo es el electrodo en donde se lleva a cabo la reducción de la solución electrolítica; este es representado como el polo negativo. El ánodo es el electrodo en donde se lleva a cabo la reacción de oxidación; en la celda electrolítica es el polo positivo (Barrera, 2014).

### 5.3.5 Ley de Faraday

De acuerdo con la ley de Faraday, la cantidad de sustancia formada en un electrodo es proporcional a la cantidad de carga que pasa a través del sistema (Restrepo *et al.*, 2006). La ley de Faraday es representada mediante la Ecuación 6.

$$C_c = \frac{I \cdot PM}{n \cdot F \cdot Q} = \left(\frac{A}{1}\right) \left(\frac{g}{mol}\right) \left(\frac{mol}{A \cdot s}\right) \left(\frac{s}{L}\right) = \frac{g}{L}$$

**Ecuación 6**

Donde:

$C_c$  = Concentración del coagulante generada en el electrodo ( $\frac{g}{L}$ )

$I$  = Intensidad de corriente eléctrica (A)

$PM$  = Peso molecular de coagulante generado ( $\frac{g}{mol}$ )

$Q$  = Caudal de tratamiento ( $\frac{L}{s}$ )

$n$  = Número de electrones transferidos (3 para el aluminio)

$F$  = Constante de Faraday ( $96,486 \frac{C}{mol}$ )

$C$  = Coulomb (A\*s)

#### 5.4 ELECTROCOAGULACIÓN

La electrocoagulación (EC) es un proceso en el que se produce la liberación de agentes coagulantes gracias a la disolución de un ánodo (polo positivo) tal y como se muestra en la Figura 12 (Barrera, 2014). La especie del agente coagulante depende del material del ánodo que se utilice (comúnmente  $Al^{+3}$  o  $Fe^{+3}$ ).

La EC consiste en la inducción de una corriente eléctrica a placas metálicas (electrodos), acomodadas de tal manera que sea posible la aplicación de un polo negativo (cátodo) y un polo positivo (ánodo). En el ánodo se generan iones metálicos que funcionan como agentes coagulantes.

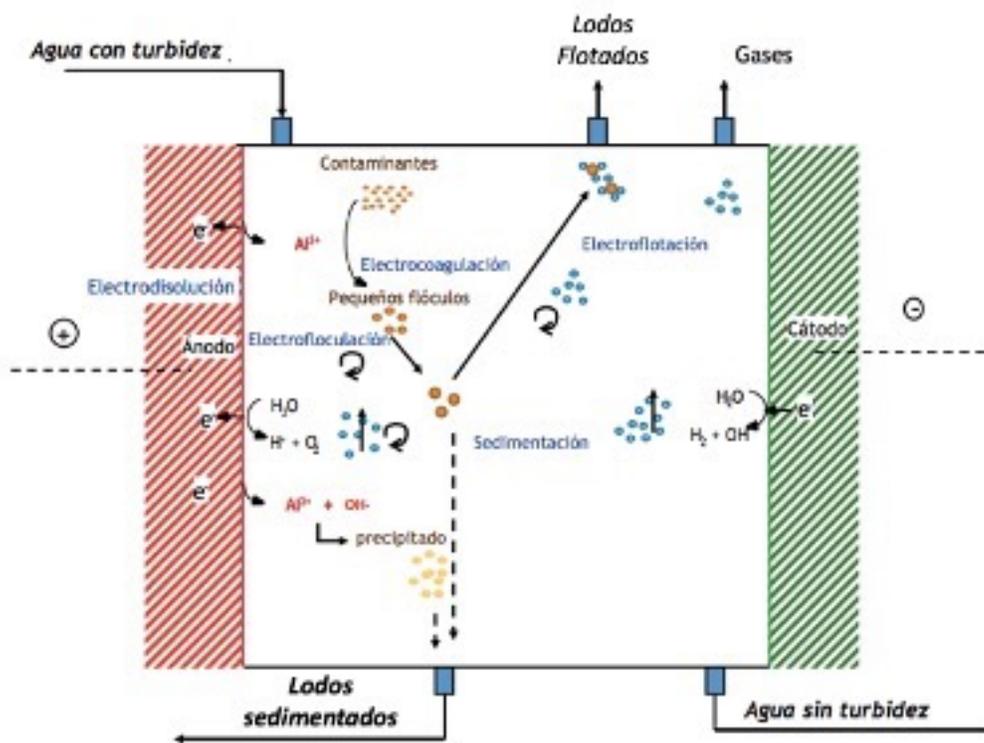


Figura 12. Esquema del tratamiento de agua por medio de la aplicación de electrocoagulación y electroflotación (modificado de Barrera, 2014).

La electrocoagulación (EC) es una alternativa electroquímica capaz de potabilizar el agua.

La EC se lleva a cabo en un reactor o celda electroquímica alimentada por medio de una corriente continua, aplicada generalmente a electrodos de hierro o aluminio, con agua contaminada como electrolito (Nguyen *et al.*, 2016; Barrera, 2014).

En su forma más sencilla, un reactor de electrocoagulación comprende una celda electrolítica que contiene un ánodo y cátodo, conectados a una fuente de poder que aplica una cierta corriente eléctrica (Rivera *et al.*, 2006).

## 5.5 ELECTROFLOTACIÓN

La electroflotación (EF) es el proceso mediante el cual los contaminantes de baja densidad tienden a flotar gracias a la formación de burbujas de oxígeno e hidrógeno en el ánodo y el cátodo respectivamente, mediante la hidrólisis del agua. La eficiencia del proceso de flotación está determinada por el tamaño de las burbujas generadas; son preferibles las burbujas pequeñas ya que proporcionan una mayor superficie de contacto para la adsorción de los coloides a remover (Suarez *et al.*, 2015).

La electroflotación, como cualquier otro proceso de flotación, aprovecha la facilidad que tienen ciertas partículas sólidas a flotar, aglomerando las mismas en la superficie del líquido que las contiene gracias a la acción de las burbujas de gas. Su eficiencia depende de la colisión entre las burbujas y los flocs generados en el proceso electrolítico, y para que la colisión conduzca a la adhesión de las burbujas con los contaminantes, es necesaria una adecuada desestabilización eléctrica de los mismos.

Las burbujas están cargadas negativamente al igual que un coloide en su forma natural, por ello es necesaria la adición de un coagulante químico para generar cargas positivas en la periferia del coloide, en este caso, la periferia de las microalgas (Valeriano, 2018). Existen estudios que mencionan que es posible provocar una carga positiva en las burbujas generadas, volviéndolas capaces de reaccionar con los coloides, y de esta manera prescindir de la presencia de coagulante, sin embargo, estos procesos suelen ser costosos por el alto consumo energético y la constante alteración extrema del pH de la solución (Rojas *et al.*, 2018; Ghernaout *et al.*, 2014).

## **5.6 FACTORES INVOLUCRADOS EN EL DESEMPEÑO DE UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN/FLOTACIÓN**

La electrocoagulación/flotación (ECF) es un proceso complejo, en el que varios factores resultan protagonistas en la eficiencia de la eliminación de un contaminante, por ejemplo: la pasivación de los electrodos, la separación entre ellos, la densidad de corriente, la temperatura y el pH de la solución son algunos de estos (Reza y Shang, 2019).

Además existen los factores hidráulicos, los cuales llegan a ser fundamentales en la descripción de la dinámica del medio. Estos factores pueden llegar a favorecer o disminuir la eficiencia de los procesos aplicados, como la velocidad del flujo, el tamaño de burbuja y el tiempo de retención hidráulico.

### **5.6.1 Factores fisicoquímicos**

#### **5.6.1.1 Concentración de microalgas**

En un proceso de ECF, la concentración de microalgas en el medio juega un papel importante a la hora de dictaminar la factibilidad del sistema. En un contexto de baja concentración de coloides, es necesaria una mayor dosis de coagulante y óptimas condiciones de mezclado para aumentar sus posibilidades de colisionar y ser neutralizados, para generar los flocs que posteriormente serán removidos por flotación y/o sedimentación (Ghernaout *et al.*, 2012)

### **5.6.1.2 Tamaño de burbuja**

El desempeño del proceso de ECF es fuertemente influenciado por el tamaño de las burbujas generadas en la electrólisis del agua (burbujas de O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>), esto debido a que las más finas provocan mayor número de colisiones con las partículas del contaminante y, por ende, esto genera un mayor porcentaje de remoción. Comúnmente los tamaños de estas burbujas son evaluados por medio de una cámara de alta velocidad (Mejri *et al.*, 2018; Alam y Shang, 2017; Issaoui *et al.*, 2017; Liyui *et al.*, 2014)

Existen diversos factores que afectan el tamaño de estas burbujas, tales como la densidad de corriente, el pH y la conductividad del agua.

### **5.6.1.3 Temperatura**

Es importante considerar que, a pesar de no ser estudiada a fondo, la temperatura es un factor fisicoquímico relevante en el proceso de electrocoagulación/flotación. Se ha demostrado que, a temperatura elevada, es posible evitar y/o destruir la película de óxidos de aluminio que se generan en la superficie de los electrodos y que provocan su pasivación (Piña *et al.*, 2011). Barros *et al.*, (2015) sugieren que en un proceso de ECF, elevar la temperatura de 18 a 36 °C, puede elevar la eficiencia de 46 a 98% respectivamente.

Además, una alta temperatura es capaz de favorecer el proceso de floculación pericinética, la cual se refiere a la aglomeración de los flocs menores a una micra, debido al aumento del movimiento molecular en el medio acuático (Hendricks, 2011).

La temperatura no suele ser un factor considerado como una variable principal en un proceso de electrocoagulación/flotación, debido a que la manipulación de esta requiere de un alto consumo energético y por lo tanto, altos costos de operación.

### **5.6.1.4 pH y alcalinidad**

El pH se refiere a la medida de acidez o alcalinidad de una solución acuosa. En un proceso de ECF (específicamente hablando de la remoción de microalgas), el pH influye en la capacidad para formar especies metálicas hidrolizadas capaces de desestabilizar los coloides y formar flocs insolubles que puedan removerse por sedimentación o flotación. Se ha reportado que la condición adecuada para trabajar con procesos de ECF en continuo, es de valores de pH en el intervalo de neutro a ácido. En un pH entre 4-7, los hidróxidos de aluminio precipitan en forma de cationes de hidróxidos de aluminio monoméricos, siendo Al<sub>13</sub>O<sub>4</sub>(OH)<sub>24</sub><sup>7+</sup> una de las especies más comunes en solución. Dicho hidróxido reacciona con la carga negativa de la superficie de las microalgas, favoreciendo su remoción por flotación o sedimentación (Parmentier *et al.*, 2020; Barros *et al.*, 2015; Golzary *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2010). En condiciones alcalinas, los hidróxidos de aluminio monoméricos que predominan son de carga negativa, disminuyendo la eficiencia de remoción de las microalgas (Gao *et al.*, 2010).

## 5.6.2 Factores electroquímicos

### 5.6.2.1 Pasivación de electrodos

La pasivación es la acumulación de una capa inhibidora en la superficie del electrodo, lo que aumenta la resistencia al paso de corriente (Piña *et al.*, 2011). Este fenómeno interviene de forma desfavorable en el proceso de electrocoagulación; cuando la formación de la capa inhibidora en los electrodos aumenta, la resistencia eléctrica también lo hace, y bajo la necesidad de seguir aplicando el amperaje establecido, el voltaje incrementa. Este aumento repentino en el voltaje se traduce en mayores costos de operación (Parmentier *et al.*, 2020; Moussa *et al.*, 2016; Wiley *et al.*, 2016; Sahu *et al.*, 2014).

Existen diferentes alternativas para prevenir y/o disminuir los efectos de la pasivación de los electrodos, como lo pueden ser:

- Limpiar los electrodos mecánica o químicamente (Parmentier *et al.*, 2020; Sahu *et al.*, 2014)
- Aumentar la concentración de iones  $\text{Cl}^-$  en la solución (Gao *et al.*, 2010; Moussa *et al.*, 2016; Sahu *et al.*, 2014).
- Cambiar la polaridad de los electrodos (Sahu *et al.*, 2014; Moussa *et al.*, 2016).
- Disminuir los valores de densidad de corriente (Gelover *et al.*, 2014)

### 5.6.2.2 Conductividad

En un proceso de ECF, un aumento en la conductividad genera una reducción en la resistencia a fluir de los electrones, disminuyendo el voltaje del sistema. La conductividad disminuye la resistencia al paso de la corriente, traduciéndose en menor voltaje.

El aumento de la conductividad en una solución es proporcional a la concentración de todos los iones presentes en la misma. Además, el tamaño de burbujas se relaciona con esta, debido a que cuando aumenta, la fuerza iónica también lo hace, provocando que las burbujas generadas en los electrodos sean de mayor tamaño con tendencia a romperse. Esto provoca una disminución de la eficiencia del proceso (Barros *et al.*, 2015).

### 5.6.2.3 Densidad de corriente

La densidad de corriente se define como la corriente eléctrica por unidad de área activa del electrodo. Esta variable tiene un efecto directo sobre el proceso de ECF; a mayor densidad de corriente puede existir un aumento en la remoción de un contaminante, sin dejar de lado que este factor depende, tanto de la corriente aplicada, como del área del electrodo. Sin embargo, el aumento de la densidad de corriente trae consigo diferentes efectos que son necesarios tener en cuenta, por ejemplo: altos consumos de energía provocan la transformación de energía eléctrica a calórica, lo que conlleva a un aumento de la temperatura en el medio.

Incluso cuando esto pueda ser favorable para el proceso, un alto consumo energético es traducido en un aumento en los costos de operación (Ghernaout *et al.*, 2015). Además, elevados valores de densidad de corriente pueden causar el fenómeno de pasivación, lo que provoca una mayor resistencia en los electrones a fluir, lo que genera una mayor demanda del voltaje y por ende mayores consumos de energía (Parmentier *et al.*, 2020; Wiley y Jonathan, 2016; Barrera 2014).

Comúnmente una densidad de corriente  $>20 \text{ A/m}^2$  y  $<100 \text{ A/m}^2$ , resulta óptimo para un proceso de ECF; entre más aumente la densidad de corriente en este intervalo, mayor número de burbujas y de menor tamaño serán liberadas al sistema, sin embargo, es importante considerar que, una cantidad excesiva de las mismas, puede causar el aumento de su tamaño en el seno del líquido debido a su coalescencia (Issaoui *et al.*, 2019; Rojas *et al.*, 2018; Alam *et al.*, 2017; Da Cruz *et al.*, 2015; Liuyi *et al.*, 2014).

#### **5.6.2.4 Separación entre electrodos**

Una mayor distancia entre electrodos aumenta la resistencia eléctrica del sistema, lo que ocasiona una demanda en el aumento de voltaje y eso, a su vez, genera mayores costos de operación (Piña *et al.*, 2011).

Con una separación  $< 3 \text{ mm}$  y durante la electrólisis, parte de la solución cercana al ánodo tiene mayor concentración de coagulante debido a la disminución de los perfiles de velocidad, provocada a su vez por efecto de la capa límite. Además, en este contexto, el volumen entre electrodos se llena parcialmente de gases durante la electrólisis, incrementando la resistencia eléctrica.

Desde un enfoque hidrodinámico, con una distancia  $\geq 5 \text{ mm}$ , resulta adecuado al obtener perfiles de flujo que no generen resistencia y, desde una perspectiva eléctrica, no se genera una excesiva demanda del voltaje (Canto J., 2018).

### **5.6.3 Factores hidráulicos**

#### **5.6.3.1 Velocidad de flujo**

Un gradiente de velocidad alto provoca mejores condiciones de mezclado en una celda electrolítica; genera un flujo desordenado y dispersa mejor el coagulante, por lo tanto, existe una mejor calidad de flóculos, lo que se traduce en una mayor tasa de remoción del contaminante (Suárez *et al.*, 2015). No obstante, una vez generados los flocs, un constante gradiente de velocidad elevado puede llegar a ser agresivo para los mismos, provocando su rompimiento. Es por ello por lo que se recomienda utilizar perfiles de velocidad elevados para generar un buen mezclado entre el coloide y el coagulante, pero una vez generados estos flocs, es recomendable establecer perfiles de velocidad bajos que permitan su crecimiento sin romper los mismos (Hendricks, 2011; Essadki *et al.*, 2008).

### 5.6.3.2 Tiempo de retención hidráulico

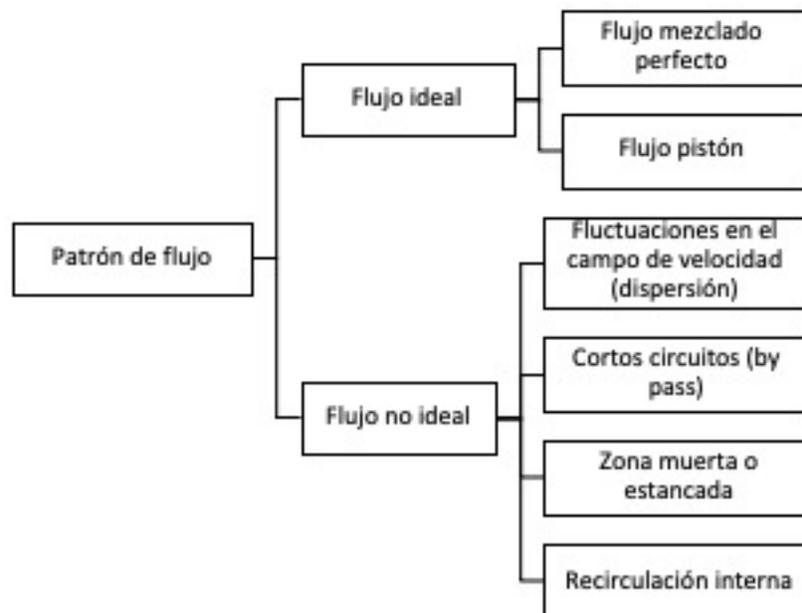
El tiempo de retención hidráulico (TRH) se refiere al tiempo en el que todas las moléculas de un líquido permanecen en un volumen de control. Se ha reportado que un tiempo de residencia elevado favorece el proceso de ECF, debido a que un TRH mayor está relacionado con un mayor tiempo de interacción entre los componentes del sistema (coagulante, contaminante y gas), esto siempre y cuando:

- Los flocs no obtengan un tamaño que dificulte su flotación, el intervalo recomendado es  $10 \mu\text{m} \leq \text{diámetro} \leq 100 \mu\text{m}$ .
- Los flocs no aumenten de tamaño al grado de ser más sensibles a su rompimiento (Canto, 2018)
- Las burbujas no aumenten su tamaño de manera indeseable ( $>150\mu\text{m}$ ) (Hendricks, 2011)

Para incrementar el TRH de un reactor, en un comportamiento en continuo para un caudal determinado, es necesaria la construcción de unidades de mayor tamaño, lo que a su vez incrementa los costos de inversión (López *et al.*, 2019).

### 5.6.3.3 Distribución de tiempos de residencia

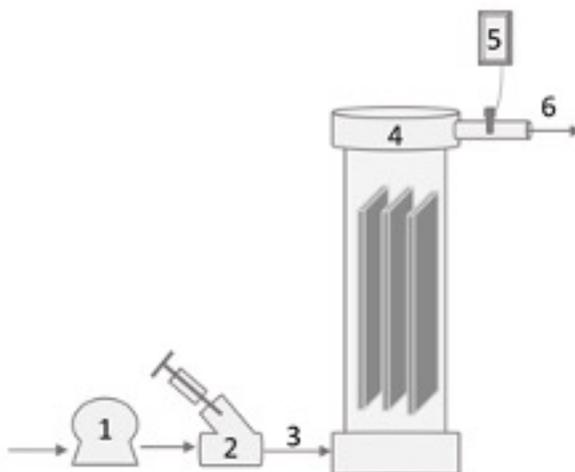
Una vez que el coagulante y las burbujas son generadas, la interacción de éstos con las microalgas determina el grado de eficiencia en un proceso de ECF. Por ello resulta imprescindible determinar y/o detectar desviaciones en el patrón del flujo dentro de la unidad, el cual puede ser clasificado como ideal y no ideal (ver Figura 13).



**Figura 13. Clasificación de reactores según el tipo de flujo: ideal y no ideal (modificado de Barrera, 2014).**

Un flujo no ideal puede ser causado por diferentes razones: fluctuaciones en el campo de velocidad debido a la difusión molecular o turbulenta, recirculación de los elementos del fluido (coagulante, burbujas, microalgas, etc.), canalización y/o presencia de zonas muertas dentro del sistema. La presencia de no idealidades en el flujo modifica el tiempo de residencia del reactor y genera una nueva “distribución de tiempos de residencia” (DTR) o “curva C”. Esta curva C (o DTR) puede ser obtenida de manera experimental por medio de dos técnicas:

- Técnica de pulso: Se trata de inyectar un trazador a la entrada del reactor en una acción corta y precisa, y determinar su concentración a la salida en función del tiempo (ver Figura 14) hasta que regrese al valor antes de la inyección.
- Técnica de escalón: Consiste en introducir un trazador con un flujo constante en la entrada del reactor, y medir su concentración a la salida hasta que ya no varíe con el tiempo.



**Figura 14. Esquema de la técnica de pulso, utilizando NaCl como trazador. (1) bomba peristáltica; (2) inyección de trazador a pulso; (3) influente; (4) reactor de ECF; (5) conductímetro; (6) efluente (elaboración propia).**

Como trazadores se pueden utilizar: colorantes, ácidos, bases, sales, isótopos radioactivos, etc. La forma de medirlos dependerá del tipo de trazador, por ejemplo, al utilizar una sal como trazador, es posible evaluar el patrón de flujo por medio de la conductividad eléctrica del fluido o los sólidos disueltos totales. Para plasmar el comportamiento de un patrón de flujo de manera gráfica, en su manera más sencilla, basta con organizar los datos del tiempo en el eje de las abscisas y los datos de conductividad en el eje de las ordenadas. Los comportamientos para

cada patrón suelen variar, por lo que es importante dominar la geometría para distintos comportamientos. Entre mayor sea el área bajo la curva, mayor dispersión está reflejando (mayor mezclado), tal y como se muestra en la Figura 15.

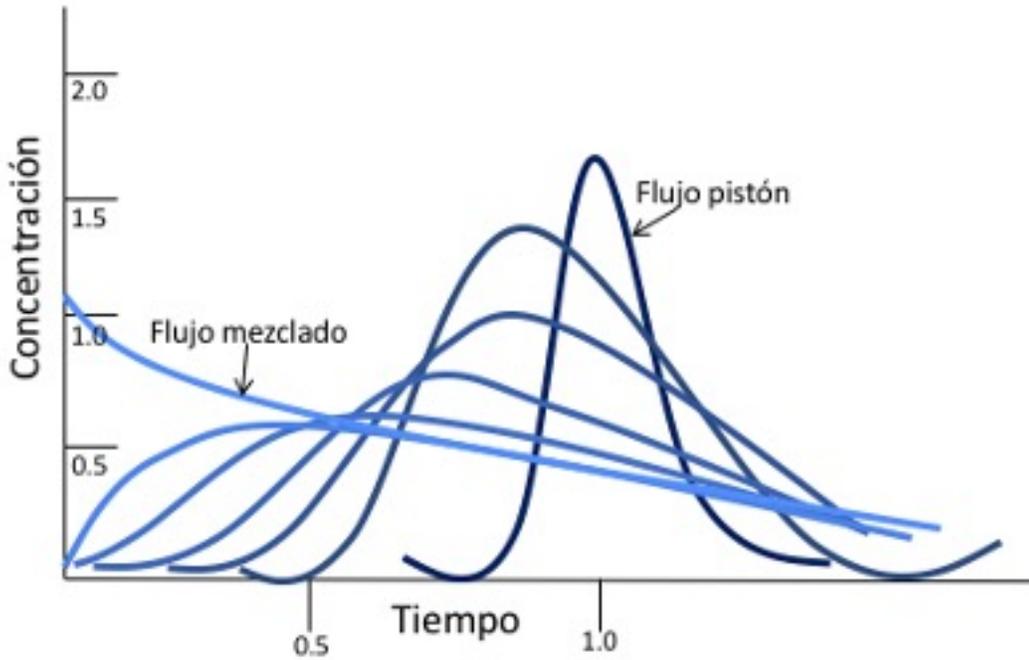


Figura 15. Evolución de una curva de trazador por medio de la técnica de pulso (modificado de Levenspiel 1999).

## 5.7 COSTOS EN UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN/FLOTACIÓN

A pesar de ser considerada como una tecnología viable para el tratamiento del agua (Papadopoulos *et al.*, 2019; Muylaert *et al.*, 2017; Moussa *et al.*, 2016; Hashim *et al.*, 2017), la ECF aún cuenta con ciertas áreas de oportunidad para su mejoramiento, como lo es el dimensionamiento de sus reactores (Moussa *et al.*, 2016), y la disminución de sus costos de operación, los cuales radican en la construcción del sistema y la sustitución constante de los electrodos debido a la pérdida de masa en los mismos (Parmentier *et al.*, 2020; Hashim *et al.*, 2017; Essadki *et al.*, 2008). La mejor manera de optimizar el consumo de los electrodos es explotar los beneficios de la presencia de burbujas en un proceso de ECF (Alam *et al.*, 2017; Naje *et al.*, 2016; Kotti *et al.*, 2013; Hendricks *et al.*, 2011; Essadki *et al.*, 2008).

Comúnmente, dentro del cálculo de costos de operación se involucra el consumo energético y el consumo de electrodos (Papadopoulos *et al.*, 2019; Hashim *et al.*, 2017; Naje *et al.*, 2016), esto expresado mediante la Ecuación 7:

$$\text{Costos de operación} = aC_{\text{energía}} + bC_{\text{electrodos}}$$

*Ecuación 7*

Donde:

$C_{\text{energía}}$  = Consumo de energía

$C_{\text{electrodos}}$  = Consumo de electrodos

$a$  = Precio vigente de la energía en México (\$/kW).

$b$  = Precio vigente del aluminio en México (\$/kg).

A su vez, el consumo energético puede ser calculado por medio de la Ecuación 8:

$$E = \frac{I * V_a * t}{Vol} = \frac{A * V * h}{m^3} = \left( \frac{W * h}{m^3} \right) \left( \frac{1kW}{1000W} \right) = \frac{kW}{m^3}$$

*Ecuación 8*

Donde:

$E$  = Consumo de energía eléctrica ( $kWh/m^3$ )

$I$  = Corriente eléctrica (A)

$V_a$  = Voltaje aplicado (V)

$t$  = Tiempo de electrolisis (h)

$Vol$  = Volumen de agua tratada ( $m^3$ )

$W$  = Watio (W) = A\*V

## 5.8 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Un diseño de experimentos es una herramienta eficaz para analizar los factores que provocan variaciones en un proceso determinado y obtener información, que, al ser analizada estadísticamente, proporcione evidencia objetiva que permita responder interrogantes que den pie a la mejora, optimización o resolución de un problema en dicho proceso (Dunn, 2018; Gutiérrez y de la Vara, 2012).

### 5.8.1 Definiciones básicas

Un diseño de experimentos involucra diferentes conceptos que estructuran su definición:

- a) Experimento. Es el cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, con el fin de evaluar el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado.

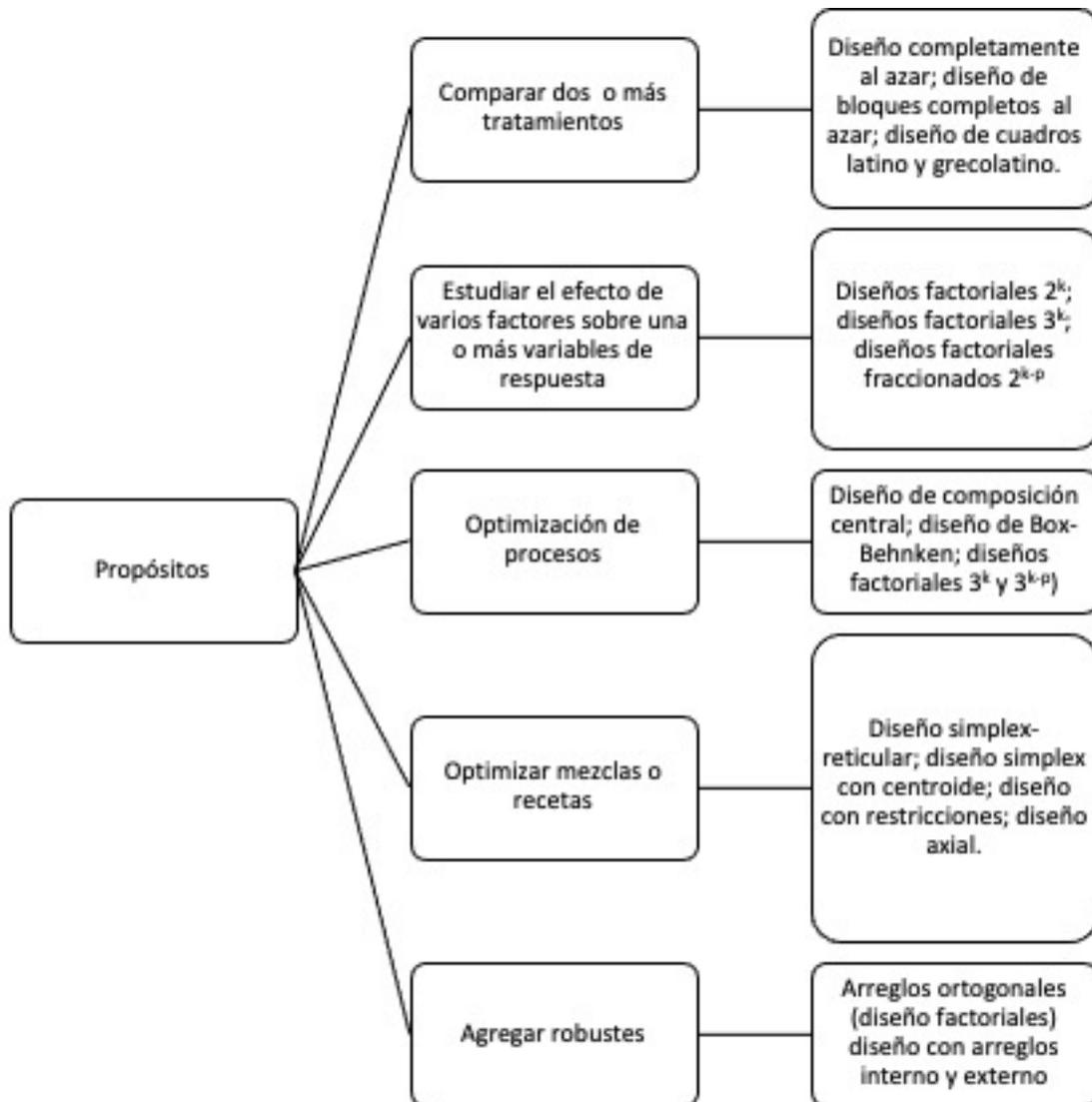
- b) Unidad experimental. Se refiere a la pieza o muestra a la que se aplica un cambio o prueba para generar un efecto representativo del resultado del experimento.
- c) Tratamiento. Conjunto de acciones que se aplican a las unidades experimentales con la finalidad de observar su respuesta a éstos.
- d) Variables de respuesta. A través de esta(s) variables(s) se conoce el efecto sobre un resultado de cada prueba experimental.
- e) Efectos de un factor. Cambio observado en la variable de respuesta, debido a un cambio de nivel de factor.
- f) Factores controlables. Variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado.
- g) Niveles. Diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental.
- h) Matriz de diseño. Conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores.

### **5.8.2 Tipos de diseños de experimentos**

Un diseño de experimentos puede albergar diferentes propósitos, como lo son:

- Comparar dos o más tratamientos
- Estudiar el efecto de varios factores sobre la(s) respuesta(s)
- Determinar el punto óptimo de operación del proceso
- Optimizar una mezcla (químicos, farmacéuticos, alimentos, etc.).
- Crear un proceso o producto robusto (insensible a factores no controlables).

De acuerdo con los diferentes propósitos, existen diferentes diseños de experimentos ver (Figura 16):



*Figura 16. Propósitos de los diferentes tipos de diseños de experimentos (modificado de Gutiérrez y De la Vara, 2012).*

### 5.8.3 Diseños factoriales $2^k$

Los diseños factoriales  $2^k$  son herramientas útiles para medir el efecto que tienen  $k$  factores en una respuesta a diferentes niveles de cada factor. Por ejemplo, un diseño  $2^3$  consta de 8 tratamientos diferentes, analizados en dos niveles ( $2 \times 2 \times 2 = 8$ ).

El objetivo de los diseños factoriales es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, a través del contraste de todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores considerados como “relevantes” en un experimento.

#### **5.8.4 Ventajas de los diseños factoriales**

En un experimento resulta imprescindible dimensionar el alcance de los recursos con los que se cuenta. Experimentar sin planeación puede traducirse en un desperdicio de recursos y, por lo tanto, un gasto económico innecesario. Una de las ventajas de los diseños factoriales es diferenciar los factores relevantes de los que no lo son, economizando los recursos con los que se cuenta y de esta manera realizar un estudio más detallado con los factores que sí son relevantes. Además, en un diseño factorial es posible estudiar el efecto individual y la interacción entre los distintos factores establecidos (Dunn, 2018; Gutiérrez y de la Vara, 2012).

#### **5.8.5 Aleatorización**

En un diseño de experimentos se tiene el supuesto de que las diferentes variables establecidas como variables de diseño, tienen un efecto tanto individual como de conjunto en la respuesta de un experimento. La aleatorización se realiza con la intención de reducir los errores sistemáticos dentro de una etapa experimental y de esta manera obtener repetibilidad entre los experimentos realizados (Dunn, 2018; Gutiérrez y de la Vara, 2012).

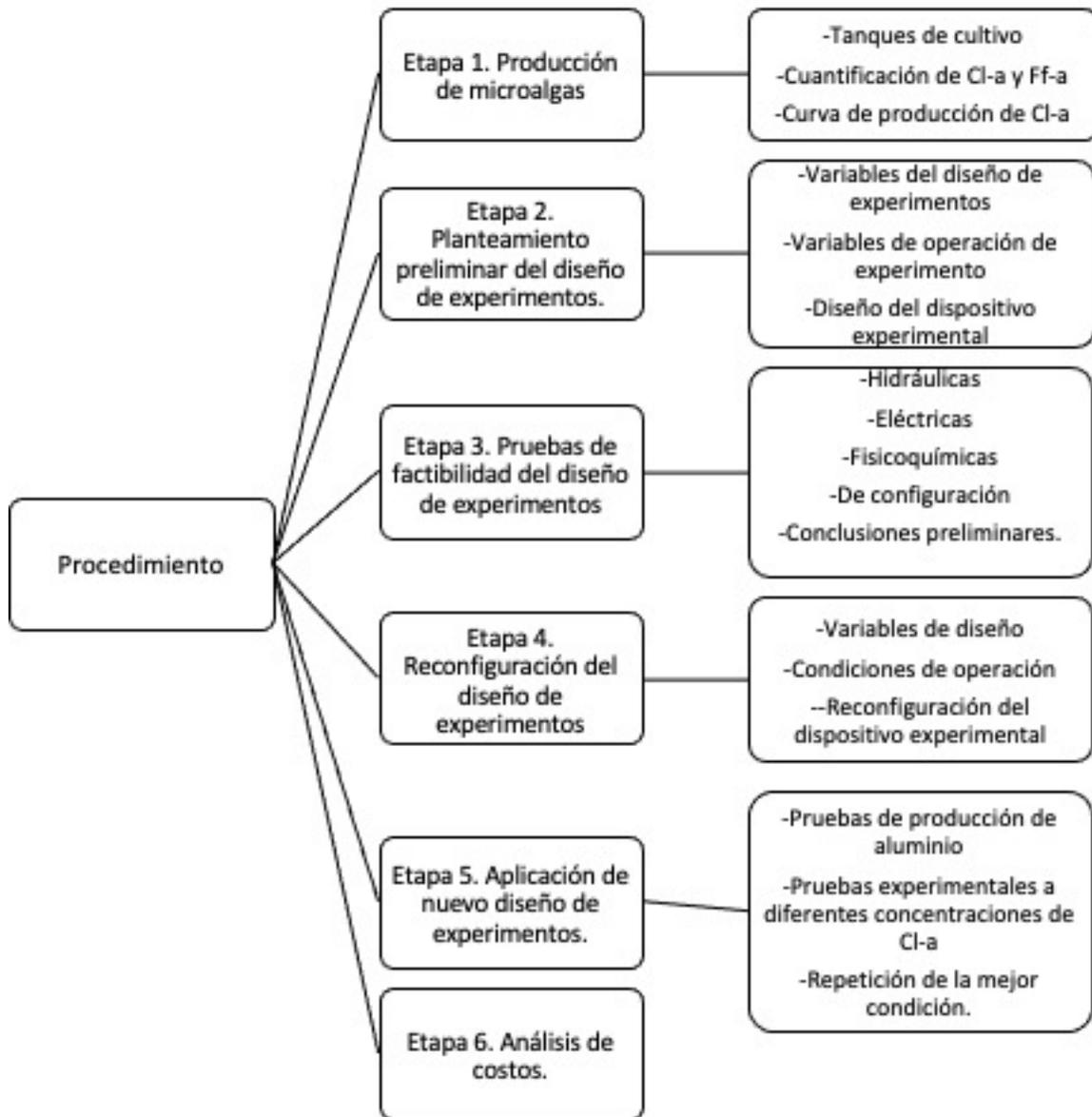
## 6 MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Se diseñó y construyó un reactor de ECF en forma de columna (ver sección 8.3.1), capaz de remover microalgas del medio acuoso; dichos organismos fueron cultivados en recipientes expuestos al aire libre. Para este proyecto se utilizó la clorofila-a (Cl-a) y el color aparente como indicadores de la presencia de microalgas en el agua. La eficiencia del reactor para la remoción de microalgas se evaluó por medio de la caracterización del agua contaminada, antes y después del tratamiento con el proceso de ECF. Con base en los objetivos planteados en este estudio, se estableció una metodología experimental dividida en seis etapas (ver Figura 17):

- 1) Producción de microalgas. Se especificó el procedimiento para llevar a cabo el cultivo de microalgas al aire libre y se evaluó su desarrollo. En la sección donde se describe esta etapa, se presenta un breve análisis de la técnica de cuantificación de la clorofila-a, misma que simultáneamente mide la concentración de feofitina-a, como preámbulo de su aplicación.
- 2) Planteamiento preliminar del diseño de experimentos. En esta etapa se estableció un diseño de experimentos, el cual fue piedra angular para la conformación del dispositivo experimental propuesto y sus condiciones de operación.
- 3) Pruebas de factibilidad de la metodología. Una vez conformado el dispositivo experimental, se realizaron pruebas preliminares que abarcaron la evaluación de su desempeño hidrodinámico, fisicoquímico, eléctrico y funcional, a fin de identificar áreas de oportunidad para su mejor, que pudieran presentarse y atenderse antes de la ejecución del diseño de experimentos.
- 4) Reconfiguración del diseño de experimentos. Una vez evaluados los resultados de la etapa 3, se reestructuró el diseño de experimentos para mejorar los componentes del sistema propuesto.
- 5) Aplicación del nuevo diseño de experimentos. Al finalizar la reestructuración del diseño de experimentos, este fue aplicado en tres corridas de la matriz de experimentos. Las mejores condiciones de operación para la remoción de microalgas fueron identificadas y analizadas estadísticamente, con intención de comprender la aportación de cada factor al proceso de ECF. Una vez reconocidas las mejores condiciones, estas fueron replicadas en una cuarta prueba experimental, con una concentración de clorofila-a al azar. Los resultados en la remoción de microalgas fueron contrastados con los calculados por modelos matemáticos generados en el análisis estadístico, con el fin de evidenciar el nivel de ajuste de dicho análisis con la realidad, y de esta manera otorgar mayor validez a los resultados presentados en este proyecto de investigación.
- 6) Análisis de costos. Una vez identificadas las mejores condiciones de operación del sistema, se obtuvieron sus costos y se compararon con las diferentes tecnologías propuestas en la literatura para la remoción de microalgas por

medio de ECF, y de este modo conocer la viabilidad económica del proceso y prototipo propuesto en este trabajo.



*Figura 17. Distribución de la metodología propuesta por este trabajo de investigación (elaboración propia).*

## 6.2 TÉCNICAS ANALÍTICAS

### 6.2.1 Caracterización del agua

Para este trabajo de investigación se utilizaron equipos existentes en el Laboratorio de Potabilización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (ver Tabla 4), con los cuales se llevó a cabo la caracterización del agua y se dio seguimiento a los parámetros de estudio durante las corridas experimentales.

*Tabla 4. Materiales y equipos utilizados en la metodología del experimento (elaboración propia).*

Equipo	Modelo y marca	Límite de detección/rango de aplicación	Precisión	Etapa experimental en la que fue empleado
Equipos utilizados para la caracterización del agua				
	Espectrofotómetro marca Hach, modelo DR2800.	340 a 900 nm $\pm$ 3 nm	$\pm$ 0.5-2 ABS	Caracterización del agua, cuantificación de clorofila-a, evaluación de la configuración del reactor.
	Potenciómetro marca Hach, modelo Sension 3.	-2 a 19 unidades de pH.	$\pm$ 0.001 %	Evaluación de la configuración del reactor.
	Conductímetro multiparámetro, marca Thermoscientific, modelo Orión Star A329.	-1.99 a 19. 99	$\pm$ 0.001 %	Pruebas eléctricas, fisicoquímicas y de evaluación de la configuración del reactor.
	Turbidímetro, marca Hach, modelo 2100p.	0 a 99 UTN, 0 a 1000 UTN.	$\pm$ 2% de lectura de 0 a 1000 UTN.	Pruebas, fisicoquímicas y de evaluación de la configuración del reactor.
Equipos utilizados para para la ejecución de pruebas experimentales				

**Tabla 4. Materiales y equipos utilizados en la metodología del experimento (elaboración propia).**

Equipo	Modelo y marca	Límite de detección/rango de aplicación	Precisión	Etapa experimental en la que fue empleado
	Fuente de poder marca Sorensen, modelo DC20-150E.	0 a 20 V, 0 a 150 A.	N/A	Pruebas hidráulicas, eléctricas, fisicoquímicas de evaluación de la configuración del reactor.
	Bomba peristáltica, Marca Easy-Load, modelo máster Flex.	6 a 650 rpm, 0.2 Hp.	N/A	Pruebas hidráulicas, eléctricas, fisicoquímicas y de evaluación de la configuración del reactor.
	Bomba de vacío Fisher Scientific.	0 a 30" de vacío	N/A	Caracterización del agua, cuantificación de la clorofila-a.
	Equipo de jarras, marca Phipps & Bird, modelo 7790-900B.	0.1 a 300 rpm	$\pm 1$ rpm	Pruebas fisicoquímicas.
	Voltímetro marca Fluxe, modelo 365 F.	1 a 1000 A; 1 a 1000 V; 1 a 500 Hz; 1 a 6000 $\Omega$	N/A	Pruebas eléctricas.

### 6.2.2 Métodos para la caracterización del agua

Los parámetros de caracterización del agua son descritos en la Tabla 5, junto con el método correspondiente utilizado:

**Tabla 5. Parámetros evaluados en la caracterización del agua (elaboración propia).**

Parámetros de campo			
Parámetro	Equipo de medición		Intervalo de medición
Conductividad	Conductímetro		-1.99 a 19.99 $\mu\text{S/cm}$
pH	Potenciómetro		-2 a 12
Temperatura	Conductímetro		-1.99 a 19.99 $^{\circ}\text{C}$
Parámetros en laboratorio			
Parámetro	Método	Número de método	Intervalo de medición
Alcalinidad total	Titulación ácido base. Método Hach	No: 8203	-----
Aluminio	Espectrofotometría. Método Hach	No: 8012	0.008-0.8 mg/L de $\text{Al}^{3+}$
Clorofila A	Espectrofotometría. Standard Methods.	No: 10200 H.	-----
Color aparente	Espectrofotometría. Método Hach	No. 8025	0-500 U Pt-Co
COT (bajo rango)	Espectrofotometría. Método Hach	No. 1129	0.3 a 20 mg/L de C
Hierro	Espectrofotometría. Método Hach	No. 8008	0 a 3 mg/L de Fe
DQO (bajo rango)	Espectrofotometría.	NMX-AA-030/1- SCFI-2012	5 a 150 mg/L
Turbidez	Turbidímetro	Hach 2100QIS.	0 a 1000 UTN

Es importante destacar que, en este trabajo de investigación, no se midió color verdadero, debido a que el agua utilizada para todas las pruebas experimentales fue extraída de un cultivo de microalgas a cielo abierto, la cual carece de sólidos disueltos, provocando que todos los sólidos suspendidos (microalgas) quedaran retenidos en el filtro que demanda la técnica aplicable (técnica No. 2120 del manual Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22<sup>o</sup> edición).

### 6.2.3 Cuantificación de clorofila-a y feofitina-a.

La cuantificación de clorofila-a (*Cl-a*) y feofitina-a (*Ff-a*), se realizó de acuerdo con lo especificado por la técnica 10200H (Standard Methods, 1999); la cual se describe en cinco pasos:

1. Filtración de la muestra hasta saturar el filtro (ver Figura 18 y Figura 19). Una vez saturado, este se coloca en un tubo de centrifuga de 15 mL (ver Figura 20) y se agregan 5 mL de acetona al 90% para su posterior

trituration con un homogeneizador de tejidos (ver Figura 21). Ya molido dentro del tubo se agregan otros 5 mL de acetona, se cierra el tubo y es refrigerado a 4 °C; con esto comienza la extracción del pigmento.

2. Extracción del pigmento por medio de acetona. En cuanto el tubo es refrigerado, es necesario esperar un mínimo de 24 h y un máximo de 48 para realizar el siguiente paso.
3. Centrifugación. Concluido el tiempo de extracción, la muestra es centrifugada a 3000 rpm por 10 minutos.
4. Cuantificación de absorbancias. Para la evaluación de clorofila-a se coloca parte del extracto centrifugado en una celda de cuarzo totalmente limpia, evitando cualquier partícula sólida proveniente del filtro (ver Figura 22) y se mide en el espectrofotómetro a dos longitudes de onda: 665 y 750 nm (esta última es utilizada como corrección a cualquier tipo de turbiedad provocada por alguna partícula ajena a las microalgas). Para la valoración de feofitina-a, el mismo extracto es acidificado con 0.1 mL de HCl 0.1N, se deja reposar por 90 s (tornando el pigmento verde a una tonalidad amarillenta como se muestra en la Figura 23) y vuelve a ser valorada en el espectro a las mismas longitudes de onda (665 y 750 nm). Los valores de absorbancia obtenidos son tratados por las Ecuación 9 y Ecuación 10.

$$Cl - a \left( \frac{mg}{m^3} \right) = \frac{A \times K (665_a - 665_d) \times va}{vf \times w} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Ff - a a \left( \frac{mg}{m^3} \right) = \frac{A \times K (R(665_d) - 665_a) \times va}{vf \times w} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$665_a$ : Absorción antes de acidificar.

$665_d$ : Absorción después de acidificar.

$A$ : Coeficiente de absorción de clorofila-a= 11

$K$ : Tasa que expresa la corrección por la acidificación= 2.43.

$R$ : Tasa máxima de  $665_a$  y  $665_d$ , en ausencia de feopigmentos= 1.7.

$va$ : Volumen de acetona usado en la extracción (mL)

$vf$ : Volumen de agua filtrada (L)

$w$ : Ancho del camino que recorre la luz a través de la celda de cuarzo = 1 cm.



**Figura 18. Filtrado de muestra.**



**Figura 19. Filtro saturado**



**Figura 20. Colocación de filtro dentro de tubo de centrifuga, previo a su maceración.**



**Figura 21. Homogeneizador de tejidos utilizado para la maceración del filtro.**



*Figura 22. Celda de cuarzo antes de acidificar.*



*Figura 23. Celda de cuarzo después de acidificar.*

En la etapa de filtración de la muestra, la técnica menciona distintos tipos de filtros como los idóneos. Por esta razón se realizó una prueba comparativa con tres diferentes filtros, para descartar diferencias en su desempeño.

Los filtros contrastados fueron de membrana de celulosa (MC) con un diámetro de poro de  $0.45 \mu\text{m}$  y de fibra de vidrio de  $1 \mu\text{m}$  (GFB); ambos mencionados por la técnica 10200H del manual "Standard Methods, Examination for the Wastewater Examination of Water and Wastewater" 22ava edición; además, a esta comparación se agregó un filtro de fibra de vidrio de  $1.2 \mu\text{m}$  (GFC), propuesto por especialistas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua del área de Limnología.

La prueba comparativa se realizó filtrando una única muestra a través de los filtros propuestos de manera simultánea. La muestra de agua fue obtenida de un cuerpo de agua léntico natural ubicado en el "Parque Alameda solidaridad", con dirección en Boulevard Paseo Cuauhnahuac km 1.5. Colonia Vicente Estrada Cajigal, 62460, en el municipio de Cuernavaca, Morelos. Se eligió este sitio de extracción debido a que su concentración de clorofila era de  $133 \mu\text{g/L}$ , que de acuerdo con el índice de Carlson, corresponde a un cuerpo de agua eutrófico.

Al concluir la prueba fue posible observar:

- Los filtros GFB y GFC presentan un desempeño similar en la cuantificación de clorofila-a, sin embargo, los GFB tardan mayor tiempo en filtrar el mismo volumen de muestra.
- El filtro MC presentó un pronto taponamiento, lo que provocó extender el tiempo de filtración de la muestra y un menor volumen de agua filtrado.

- Previo a la cuantificación de las absorbancias, al introducir el pigmento extraído en la celda de cuarzo, los filtros GFB presentaron pequeños fragmentos del mismo en suspensión debido a su textura afelpada.
- Los filtros de celulosa presentaron un valor de clorofila-a menor a los filtros GFB y GFC (Tabla 6).

**Tabla 6. Evaluación de los diferentes filtros propuestos para la cuantificación de clorofila-a (elaboración propia).**

Filtro	Diámetro de poro ( $\mu\text{m}$ )	Tiempo de filtrado (min)	Volumen filtrado (mL)	Clorofila ( $\mu\text{g/L}$ )
Membrana de celulosa (MC)	0.45	96	95	33.4
Fibra de vidrio (GFB)	1	70	130	182.9
Fibra de vidrio (GFC)	1.2	36	130	187

Según parte de la literatura consultada, la diferencia en el desempeño de los filtros puede deberse a que el filtro MC retiene, además de las microalgas, pequeñas partículas de suelo como arcillas y/o limos, típicas de un cuerpo de agua natural, lo que disminuye la presencia de clorofila-a (Bravo y Tomasini, 2017). Se recomienda realizar una extensa comparación de los diferentes filtros propuestos por la técnica utilizada, con intención determinar las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

En este trabajo se utilizaron filtros de fibra de vidrio con 1.2  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro (GFC), los cuales no presentaron ningún tipo residuo en la cuantificación del pigmento y obtuvieron un desempeño muy similar al filtro propuesto por el manual consultado.

## 7 PRODUCCIÓN DE MICROALGAS

### 7.1 TANQUES DE CULTIVO

Se realizó la implementación de cultivos de microalgas a cielo abierto, con intención de:

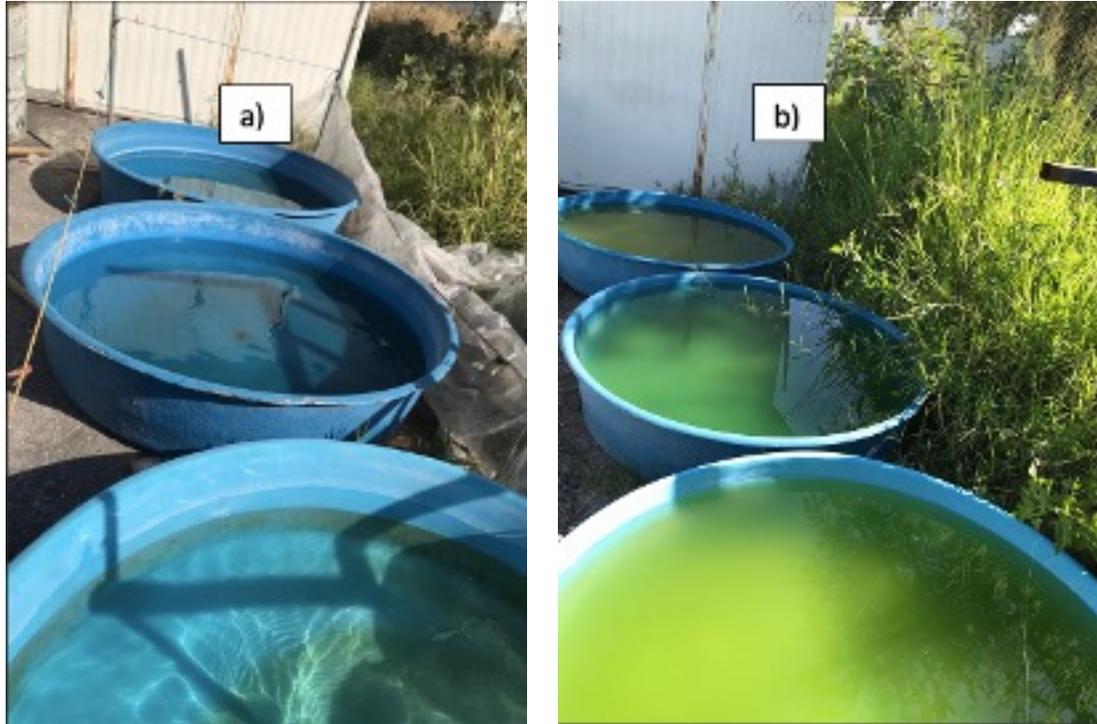
- Obtener un volumen de agua con una concentración relevante de microalgas, utilizando clorofila-a como indicador principal de la presencia de estas (concentraciones por encima de los 50  $\mu\text{g/L}$  son consideradas como típicas de un cuerpo de agua eutrófico).
- Conseguir un volumen de agua con la menor cantidad de sólidos y sustancias ajenas a las microalgas, asegurando así, una eficiencia neta de la tecnología en la remoción de estos microorganismos.
- Manipular, en la medida de lo posible, las concentraciones de microalgas dentro del cultivo, y de esta manera evaluar el comportamiento de la tecnología aplicada a diferentes concentraciones.

Las microalgas se cultivaron en tinas de fibra de vidrio con 170 cm de diámetro y 37 cm de alto (ver Figura 24).

Los recipientes fueron llamados reactores y se colocaron en un sitio ausente de sombra, asegurando una radiación constante. Cada uno se utilizó con un tirante de 25 cm.

Al inicio de cada cultivo, cada reactor se llenó con agua de la red de distribución del IMTA, y se alimentó todos los días por la mañana con una solución rica en nitrógeno y fósforo, con concentraciones de 20 y 21 mg/L respectivamente. Después de agregar dicha solución, cada recipiente fue agitado manualmente por 5 minutos, con la intención de generar un adecuado mezclado entre los nutrientes y el medio de cultivo.

Al finalizar cada semana, tres cuartas partes del volumen de agua fue desechado y reemplazado por agua limpia, con la finalidad de evitar que los cultivos perecieran.



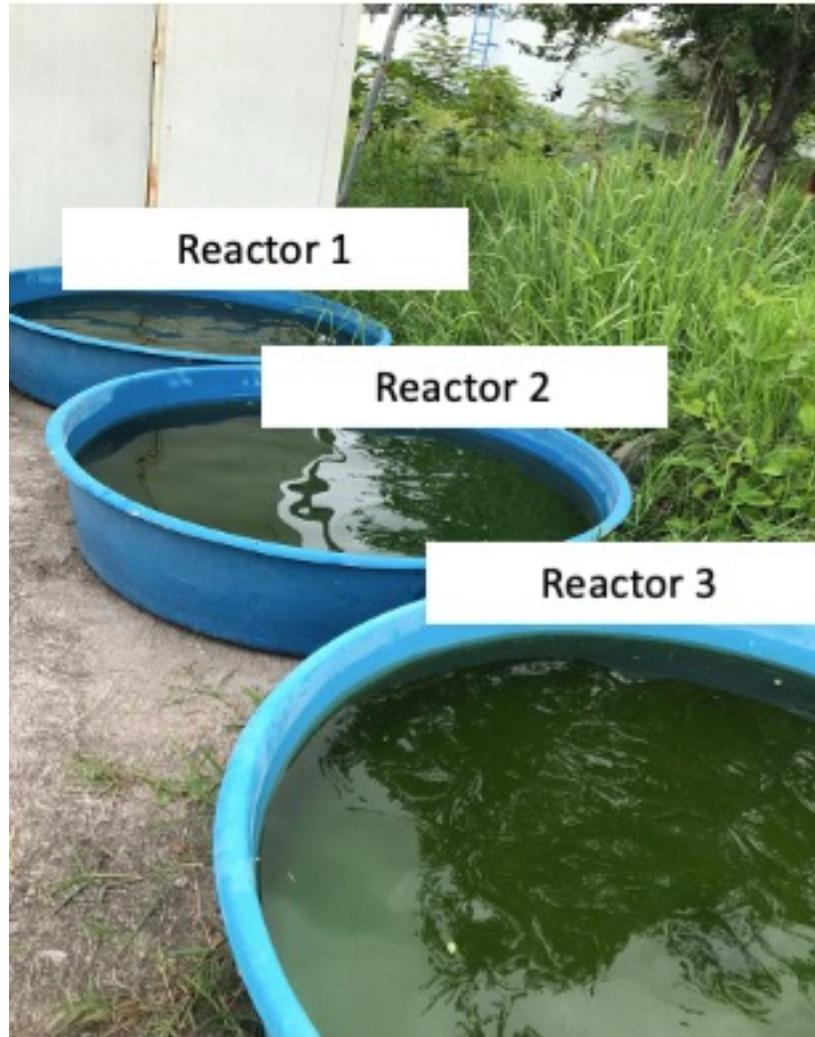
*Figura 24. Reactores para cultivos de microalgas. a) Previo a la adición de nutrientes; b) Después de la adición de nutrientes y mezclado constante.*

## 7.2 CURVA DE PRODUCCIÓN DE CLOROFILA-A

Una vez asimilado el proceso de cultivo y la técnica para determinar clorofila-a, se realizó una curva de calibración entre dicho pigmento y el color presente en el medio; esto con intención de:

- Comprender el desarrollo de las microalgas a través del tiempo, por medio de la cuantificación de clorofila-a.
- Estudiar la relación entre el color, la clorofila-a y la feofitina-a.
- Conocer la concentración máxima posible de clorofila-a generada en un cultivo a cielo abierto.

Para realizar esta curva, primero se limpiaron los recipientes para el cultivo, esto con el propósito de asegurar la pureza del consorcio. Se utilizaron tres para obtener un triplicado de los resultados (ver Figura 25). Se llenaron con agua limpia y fueron colocadas en un lugar ausente de sombra; se alimentaron y agitaron levemente a diario a la misma hora (9:00 h) con 20 L de agua nutritiva cada una (20 mg/L de N y 21 mg/L de P). Todos los días se midió color dentro de los mismos y no se midió clorofila hasta obtener un color dentro del cultivo de 100 U Pt-Co (color que comienza a reflejar un cambio físico visible dentro de las tinas). El tiempo de esta curva fue de 10 días consecutivos.



*Figura 25. Posicionamiento de reactores en curva de calibración (elaboración propia).*

### 7.3 RESULTADOS

Al terminar el periodo establecido se observó un desarrollo heterogéneo entre los tres cultivos, por lo cual fue necesaria su evaluación por separado (Tabla 7).

Reactor 1:

- Obtuvo un color aparente por encima de 100 U Pt-Co a partir del día 4 de experimentación.
- El nivel de color más elevado fue observado el día 7, con 180 U Pt-Co.
- La mayor concentración de clorofila-a fue observada el día 6, con 93  $\mu\text{g/L}$ .
- Del día 6 al 7, la feofitina-a aumentó un 41%, siendo este su valor más alto en toda la experimentación (un día después del valor más alto de clorofila-a).

- Del día 7 al 8, el nivel de color disminuyó de 180 a 75 U Pt-Co, la clorofila-a de 80 a 22  $\mu\text{g/L}$  y la feofitina-a de 30.4 a 16  $\mu\text{g/L}$ .
- Del día 9 al 10, la clorofila-a y feofitina-a obtuvieron un leve repunte en sus valores, pasando de 16.7 a 32.8  $\mu\text{g/L}$  para el primer pigmento, y de 9 a 13.1  $\mu\text{g/L}$  para el segundo.

#### Reactor 2:

- Obtuvo un color aparente por encima de 100 U Pt-Co a partir del día 5.
- El nivel de color más elevado fue observado el día 9, con 450 U Pt-Co.
- Las mayores concentraciones de clorofila-a y feofitina-a fueron observadas el mismo día (día 9), con 58 y 17.9  $\mu\text{g/L}$  respectivamente.
- Un día después de sus niveles más altos, la clorofila-a y la feofitina-a disminuyeron sus concentraciones a 35.6 y 0.5  $\mu\text{g/L}$  respectivamente.

#### Reactor 3:

- Obtuvo un color aparente por encima de 100 a partir del día 4.
- El nivel de color más elevado fue observado el día 7 con 584 U Pt-Co.
- La mayor concentración de clorofila-a fue observada el día 6, con 112.2  $\mu\text{g/L}$ .
- El mayor nivel de feofitina-a fue observado el día 7 con 33.2  $\mu\text{g/L}$ , un día después del nivel más alto de clorofila-a.
- Cerró la experimentación con valores de clorofila-a y feofitina-a de 70.1 y 32.4  $\mu\text{g/L}$  respectivamente.

Después de realizar las observaciones pertinentes, fue posible concluir que los reactores recibieron una recepción desigual de luz, lo que derivó en ciertos sucesos biológicos y fisicoquímicos que generaron un desarrollo distinto entre los consorcios.

Comúnmente, en un cultivo de microalgas, una radiación solar constante, en compañía de la inyección de los nutrientes adecuados, se traduce en un óptimo desarrollo del mismo, lo cual es reflejado en una mayor concentración de clorofila-a (pigmento indicador de un adecuado estado fisiológico de las microalgas); no obstante, un exceso de radiación puede provocar la sobrepoblación de microalgas en la superficie, lo que genera un déficit en la dinámica de los nutrientes disponibles y privando de luz a las células del fondo, desencadenando la llamada *fotoinhibición*. La combinación de estas variables genera el estrés de los cultivos, transformando la clorofila-a en feofitina-a (pigmento de una tonalidad amarillenta que describe un estado de vejez y deterioro en las microalgas). Es posible que su estrés sea tan alto que provoque su muerte; al morir se libera un polímero floculante natural, que provoca la aglomeración de sus células y posteriormente su sedimentación, este proceso es llamado *biofloculación*.

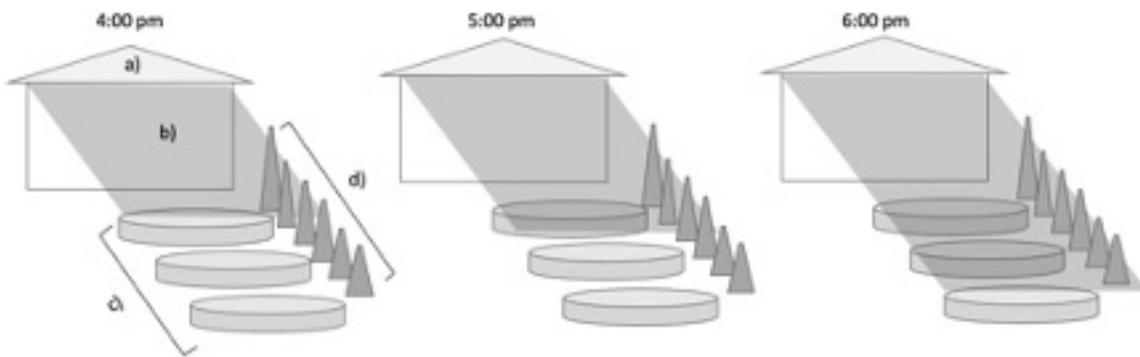
**Tabla 7. Resultados de lecturas de color, clorofila-a y feofitina-a en el tiempo (elaboración propia).**

Cultivo	Parámetro	Días de experimentación									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Reactor 1	Color (U Pt-Co)	1	50	63	121	133	137	180	75	87	86
	Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ )	S/L	S/L	S/L	88.5	87	93	80	22.1	16.7	32.8
	Feofitina-a ( $\mu\text{g/L}$ )	S/L	S/L	S/L	7.9	12.6	17.8	30.5	16.3	9	13.1
Reactor 2	Color (U Pt-Co)	0	23	26	64	106	185	273	376	450	373
	Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ )	S/L	S/L	S/L	S/L	27	44	48.7	39.2	58.8	35.6
	Feofitina-a ( $\mu\text{g/L}$ )	S/L	S/L	S/L	S/L	6.7	6.5	3.4	4.5	17.9	0.5
Reactor 3	Color (U Pt-Co)	4	32	42	153	233	383	584	580	532	430
	Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ )	S/L	S/L	S/L	65	81	112.2	101.5	76	78.4	70.1
	Feofitina-a ( $\mu\text{g/L}$ )	S/L	S/L	S/L	7.9	10	28.1	33.1	33.2	33.9	32.4

Nota: S/L =Sin lectura.

Es posible que la fotoinhibición derive en la biofloculación de manera súbita, tal y como fue observado en el reactor 1, donde en el día 7 la feofitina-a mostraba un elevado estado de estrés debido a la sobrepoblación de las microalgas y, consecuente a ello, al día siguiente la mayoría de dichos microorganismos sedimentó, provocando un descenso en el nivel de clorofila-a del 72%.

Por otro lado, el reactor 3 experimentó un crecimiento moderado de las microalgas, sin alcanzar la fotoinhibición, debido a una sombra generada (de 4:00 a 6:00 de la tarde) por una pequeña edificación cercana al sitio de exposición que se extendía desde el reactor 3 hasta parte del reactor 1 (ver Figura 26). A pesar de que dicha penumbra evitaba una sobrepoblación microalgal, generó un moderado estrés sostenido en este cultivo, lo cual es reflejado en un constante nivel de feofitina-a partir del día 6; al finalizar esta prueba el reactor 3 presentó un tono amarillento destacable (ver Figura 27).



**Figura 26. Proyección de sombra heterogénea a diferentes horas del día: a) Construcción obstructora el paso de la luz; b) Proyección de sombra; c) Recipientes de cultivo; d) Maleza obstructora del paso de la luz (elaboración propia).**

	Primer día de evaluación de clorofila-a		Último día de evaluación de clorofila-a
Reactor 1		➔	
Reactor 2		➔	
Reactor 3		➔	

**Figura 27. Comparativa de cultivos del primer día vs el último, en la medición de clorofila-a.**

El reactor 2 presentó bajos niveles de feofitina-a, evidenciando tenues niveles de estrés, esto se le atribuye a un equilibrio entre la luz y sombra experimentada.

A razón de saber qué pigmento protagonizó el color en las tinas, se utilizó la  $R^2$  como herramienta estadística (ver Figura 30 y Figura 31), concluyendo de manera individual de la siguiente forma:

- Reactor 1. En comparación con los demás recipientes, se obtuvo un mejor ajuste de regresión lineal con relación a la clorofila ( $R^2= 0.66$ ); mientras que el ajuste con relación a la feofitina-a ( $R^2= 0.46$ ) resultó menos evidente, corroborando que en esta etapa experimental, el color en dicho recipiente dependió en mayor medida de la clorofila-a que de la feofitina-a.
- Reactor 2. El valor del ajuste de regresión en relación con la clorofila-a fue de 0.37, mientras que en relación con la feofitina-a fue de 0.08, demostrando que el color en este recipiente dependió en mayor parte de la clorofila-a, que de la feofitina-a.
- Reactor 3. En este recipiente el comportamiento fue diferente a los dos anteriores, debido a que se observó un mayor ajuste con la feofitina-a ( $R^2= 0.87$ ) que con la clorofila-a ( $R^2= 0.10$ ), demostrando que el color en esta tina fue generado principalmente por la feofitina-a, en lugar que por la clorofila-a.

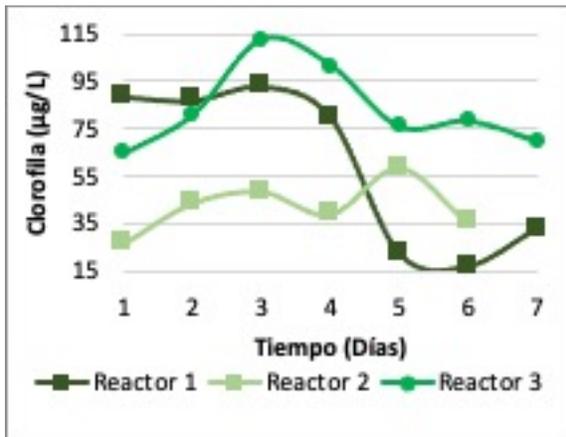


Figura 28. Evolución de clorofila-a en el tiempo (elaboración propia).

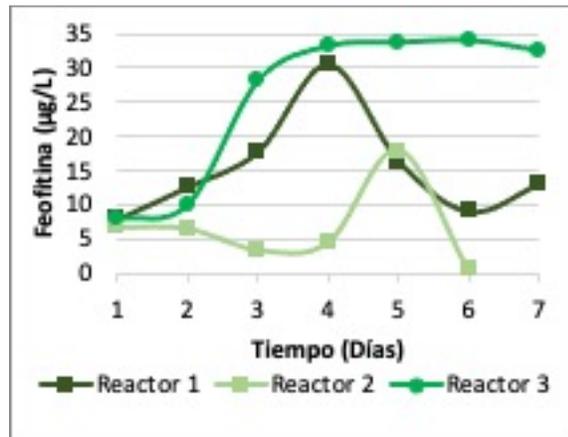


Figura 29. Evolución de feofitina-a en el tiempo (elaboración propia).

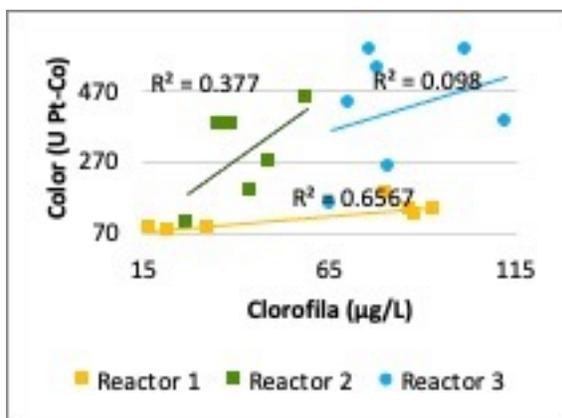


Figura 30. Relación de clorofila-a vs color en los diferentes cultivos (elaboración propia).

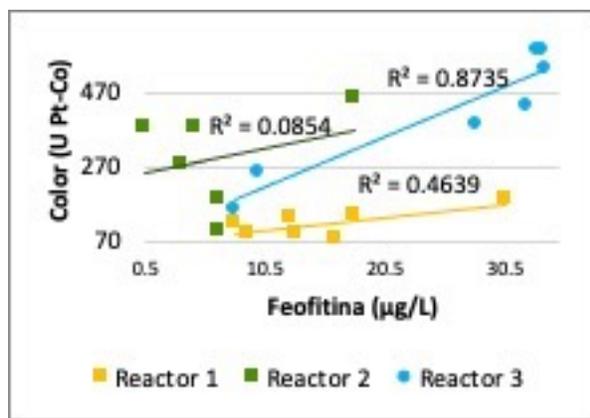


Figura 31. Relación de feofitina-a vs color en los diferentes cultivos (elaboración propia).

Los tres reactores experimentaron un desarrollo desigual entre sí, por lo cual se puede concluir que los cultivos a cielo abierto pueden ser una excelente alternativa para desarrollar microalgas de manera general, sin embargo, el control inadecuado de las condiciones de insolación puede ocasionar cultivos poco homogéneos; de tal forma que, si se desea alcanzar niveles y especies de microalgas específicas, se recomienda utilizar la aplicación de fotobiorreactores *in-vitro* totalmente controlados.

Una vez evaluado el nivel máximo de clorofila-a asequible en esta etapa del proyecto (120 µg/L), se contrastó dicho valor con los presentados por ciertos cuerpos de agua en México los últimos 6 años (ver Tabla 8). El valor máximo dentro de esta experimentación se encuentra, al igual que los niveles de clorofila-a en los cuerpos de agua del país, dentro de un carácter eutrófico según el índice de Carlson, ajustando de mejor manera el agua experimental de este trabajo a los objetivos del proyecto.

Tabla 8. Concentraciones máximas de clorofila-a de cuerpos de agua en México (elaboración propia).

Nombre del cuerpo de agua	Tipo	Localidad	Coordenadas	Nivel máximo de clorofila-a (µg/L)	Estado trófico según TSI de Carlson	Año de estudio	Referencia
Puerto Lobos	Laguna Costera	Sonora	30°16'26"N 112°50'48"O	64	Eutrófico	2017	Ruiz, 2017
Lago Nabor Carrillo	Lago natural	Estado de México	19°28'0"N 98°58'11"O	178	Eutrófico	2017	Bravo y Tomasini, 2017
Laguna Palizada	Laguna natural	Campeche	18°29'04" N 91°51'31" O	37.9	Mesotrófico	2017	Márquez <i>et al.</i> , 2017
Laguna de	Laguna	Campeche	18°35"N	43	Mesotrófico	2017	Márquez,

**Tabla 8. Concentraciones máximas de clorofila-a de cuerpos de agua en México (elaboración propia).**

Nombre del cuerpo de agua	Tipo	Localidad	Coordenadas	Nivel máximo de clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ )	Estado trófico según TSI de Carlson	Año de estudio	Referencia
Pom	natural		91_°50''O				<i>et al.</i> , 2017
Chapala	Lago natural	Jalisco	20°20'00"N 103°00'00"O	33.5	Eutrófico	2016	Membrillo, <i>et al.</i> , 2016
Lago de Guadalupe	Lago Natural	Ciudad de México	19° 36' 50.6"N 99° 15' 12.8" O	112.4	Eutrófico	2015	Gómez, 2015
Lagos de Montebello (Laguna Liquidambar)	Lago natural	Chiapas	16°04'40" N 91°47'40 O	79.5	Eutrófico	2015	Vera <i>et al.</i> , 2015
Presa Villa Victoria	Embalse artificial	Estado de México	19°28'0.37"N 100°0'11.52"O	234.33	Eutrófico	2014	Ramos <i>et al.</i> , 2014
Los Tuxtlas (Cráter Verde)	Lagos de Cráter	Veracruz	18° 34' N 95° 04' O	153.6	Eutrófico	2014	Vázquez <i>et al.</i> , 2014

## 8 PLANTEAMIENTO PRELIMINAR DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

### 8.1 FACTORES DE ESTUDIO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Una vez realizada una investigación bibliográfica (López et al., 2019; Motashami y Shang, 2019; Tchamango y Darchen 2018; Bajerle et al., 2015; Ghernaout et al., 2014; Hossein et al., 2011; Essadki et al., 2008), se concluyó que para optimizar un proceso de ECF, es necesario considerar la manipulación de factores que aseguren una adecuada dinámica dentro del reactor; por lo cual, se propuso un diseño de experimentos que permitiera analizar lo siguiente:

- Velocidad dentro del reactor y entre electrodos que provoque la turbulencia necesaria para obtener un adecuado mezclado entre el contaminante (microalgas) y el coagulante liberado.
- Densidad de corriente idónea que derive en un adecuado tamaño de electrodos.
- Distancia comprendida entre la salida de los electrodos y el efluente, adecuada para provocar una óptima interacción entre los flocs y las burbujas (altura libre sobre electrodos).

Por estas razones se fijaron tres variables de estudio: densidad de corriente, velocidad entre electrodos y altura libre sobre electrodos, y se propuso un diseño factorial  $2^3$  (ver Tabla 9) con cuatro centros, a razón de evaluar el efecto de las tres variables de estudio sobre la respuesta (en este caso color aparente en el efluente). El rango de valores para cada variable es descrito a continuación:

Densidad de corriente (factor A). Los valores de densidad de corriente plasmados por diferentes autores en un proceso de ECF están entre 5 y 150 A/m<sup>2</sup> (Parmentier *et al.*, 2020; Landels *et al.*, 2019; Golzary *et al.*, 2015; Kyochan *et al.* 2015; Bajerle *et al.*, 2014). Para esta etapa de la investigación se decidió fijar un nivel máximo (+1) de 60 A/m<sup>2</sup> y un nivel mínimo (-1) de 17 A/m<sup>2</sup>.

Velocidad entre electrodos (factor B). En cualquier proceso que se involucre la flotación de partículas, este factor se considera como determinante. Los intervalos de velocidad reportados se encuentran entre 0.001 y 1 m/s (Souza *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2019; Issaoui *et al.*, 2019; Hailjaoui *et al.*, 2019; Canto, 2018). Para este trabajo de investigación se propuso un nivel máximo (+1) de 0.26 m/s y un nivel mínimo (-1) de 0.06 m/s.

Altura sobre electrodos (factor C). A pesar de ser un factor poco estudiado, varios autores lo plasman intrínsecamente en el diseño de sus reactores de ECF (Souza *et al.*, 2020; Kwak *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2015; Essadki *et al.*, 2008). En este trabajo se estableció la altura libre sobre electrodos de 20 cm como un nivel máximo (+1) y un nivel mínimo (-1) de 5 cm, a fin de comprobar su efecto sobre el proceso de ECF.

**Tabla 9. Variables de estudio del diseño de experimentos preliminar (elaboración propia).**

Diseño 2 <sup>3</sup>			
Variables de diseño	Niveles		
	-1	0	1
<b>A:</b> Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	17	38	60
<b>B:</b> Velocidad entre electrodos (m/s)	0.06	0.16	0.26
<b>C:</b> Altura sobre electrodos (m)	0.05	0.13	0.20

## 8.2 VARIABLES DE OPERACIÓN DEL EXPERIMENTO

Una vez establecidas las variables de diseño, se procedió a fijar las condiciones de operación que permitieran establecer los valores de las variables de estudio descritas en la Tabla 9. En primer lugar, tanto las ecuaciones que describen el diseño del reactor como las condiciones de operación, fueron simuladas en una hoja de cálculo del programa Excel (Office 2019). Dentro de la hoja de cálculo se incluyeron las ecuaciones que se describen a continuación.

Para calcular el caudal se utilizó la Ecuación 11, en la cual se incluye la variable de estudio “velocidad entre electrodos”:

$$Q = B \left( \frac{m}{s} \right) * a \left( \frac{m^2}{1} \right) = \left( \frac{m^3}{s} \right) \left( \frac{1000 L}{m^3} \right) \left( \frac{60s}{1 min} \right) = \frac{L}{min} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:  $Q \left( \frac{L}{min} \right)$  es el caudal o flujo volumétrico de agua;  $B \left( \frac{m}{s} \right)$  es la velocidad del agua entre placas y  $a \left( m^2 \right)$  es el área transversal al flujo. Para el cálculo del área transversal se utilizó la Ecuación 12:

$$a = Se(m) * Ba(m) = m^2 \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:  $Se(m)$  es la separación entre electrodos (se fijó en 0.005 m como resultado de estudios precedentes no mostrados aquí) y  $Ba(m)$  es el ancho de estos (se fijó en 0.045 m para optimizar el material disponible). A partir de establecer la velocidad como variable de diseño, se obtuvieron los caudales necesarios para llevar a cabo cada prueba descrita por el diseño de experimentos.

Cada caudal obtenido, correspondiente a los valores establecidos de la velocidad entre placas, generó una demanda de cierto volumen de agua, el cuál fue estimado por medio de la Ecuación 13.

$$V = Q * t = \left( \frac{L}{min} \right) * \left( \frac{min}{1} \right) = L \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:  $V$  (L) es el volumen de agua necesario para realizar cada corrida del experimento;  $Q$   $\left(\frac{L}{min}\right)$  es el caudal dentro del reactor y  $t$  (min) es el tiempo destinado para cada prueba. El tiempo se propuso de 20 minutos por prueba, para dar tiempo al sistema de estabilizarse hidráulica y electroquímicamente, antes de tomar las muestras (Sánchez *et al.*, 2020; Wiley *et al.*, 2016; Golzary *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2010).

La dosis de coagulante se estableció en 10 mg/L, dicha dosis fue catalogada como eficiente en un estudio reciente perteneciente a la misma línea de investigación (Ruiz, 2021). El amperaje utilizado para cada prueba fue calculado por medio de la ley de Faraday, plasmada en la Ecuación 14:

$$I = \frac{C_{Al}nFQ}{PM} = \left(\frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1g}{1000mg}\right) \left(\frac{mol}{g}\right) \left(\frac{A*s}{mol}\right) \left(\frac{L}{min}\right) \left(\frac{1min}{60s}\right) = A \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:  $I$  es la intensidad de corriente eléctrica aplicada (A);  $C_{Al}$  es la concentración teórica de coagulante generado  $\left(\frac{mg}{L}\right)$ ;  $n$  es el número de electrones intercambiados (3 para el aluminio);  $F$  es la constante de Faraday 96485  $\left(\frac{C}{mol} = \frac{A*s}{mol}\right)$ ;  $Q$  es caudal de agua  $\left(\frac{L}{min}\right)$ ; y  $PM$  es el peso molecular de la especie generada  $\left(\frac{g}{mol}\right)$ .

Una vez establecidas las variables de diseño y calculadas las condiciones de operación, se obtuvo un diseño de 12 experimentos (Tabla 10), los cuales se realizaron al azar con intención de descartar los efectos del error sistemático en las distintas corridas experimentales.

**Tabla 10. Variables de diseño y operación del experimento (elaboración propia).**

Número de experimento	Variables de diseño sin codificar			Condiciones de operación		
	A (A/m <sup>2</sup> )	B (m/s)	C (m)	Caudal (L/min)	Intensidad de corriente (A)	Volumen de agua (L)
1	17	0.06	0.05	1.6	1.43	32
2	60	0.06	0.05	1.6	1.43	32
3	17	0.26	0.05	7	6.26	140
4	60	0.26	0.05	7	6.26	140
5	17	0.06	0.2	1.6	1.43	32
6	60	0.06	0.2	1.6	1.43	32
7	17	0.26	0.2	7	6.26	140
8	60	0.26	0.2	7	6.26	140
9	38	0.16	0.13	4.3	3.84	86
10	38	0.16	0.13	4.3	3.84	86
11	38	0.16	0.13	4.3	3.84	86
12	38	0.16	0.13	4.3	3.84	86

### 8.3 DISEÑO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Al establecer el diseño de experimentos, se dimensionó un reactor tomando en cuenta lo siguiente:

- Una configuración capaz de generar una adecuada dinámica entre los componentes del proceso de ECF (fase líquida, fase sólida, fase gaseosa y coagulante generado).
- Un desnatador capaz de impedir el arrastre de los flocs y/o espuma al efluente tratado (Efl).
- Un diseño de electrodos que permita evaluar el efecto de sus dimensiones en la eficiencia del proceso de ECF.
- Adecuadas conexiones eléctricas, capaces de conducir un flujo uniforme de electrones a través de los electrodos diseñados.

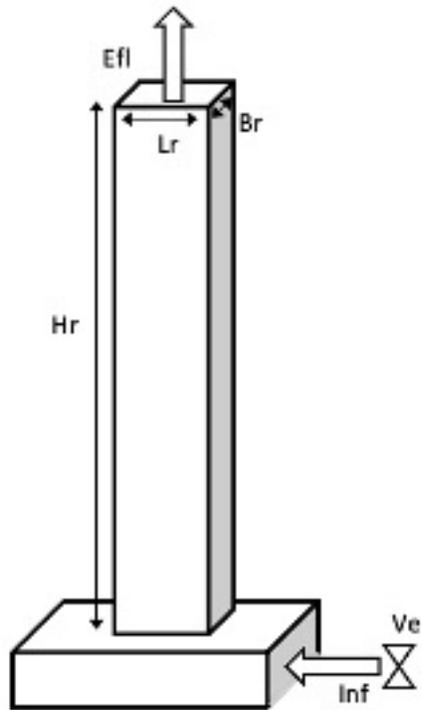
#### 8.3.1 Columna de flotación

Para la construcción del dispositivo experimental se optó por una configuración en torre o columna, propuesta por Parmentier *et al.*, 2020; Issaoui y Mansour, 2019; Tchamango y Darchen, 2018 y Essadki *et al.*, 2008, con el fin de:

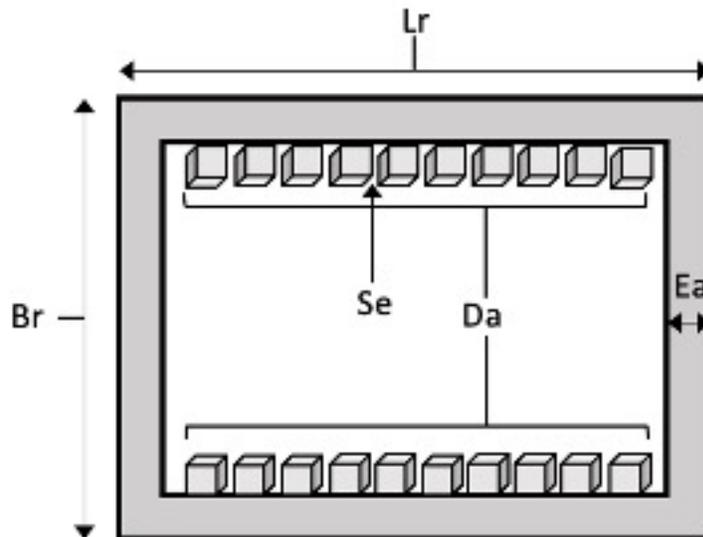
- Aprovechar la hidrodinámica y distribución de las burbujas.
- Controlar y potencializar la velocidad de ascenso del fluido (Issaoui y Mansour, 2019).
- Operar en continuo (Parmentier *et al.*, 2020).
- Disminuir las necesidades de espacio (Jacob *et al.*, 2018).

El dispositivo experimental consistió de una columna fabricada de acrílico cristal de 8 mm de espesor (Ea), altura (Hr) de 1.10 m, ancho (Br) de 0.055 m y largo (Lr) de 0.075 m (cotas internas), tal y como se puede apreciar en la Figura 32.

Dentro de la columna se colocó una guía dentada (Da) fabricada en acrílico, con la finalidad de mantener una separación uniforme entre electrodos de 0.005 m (ver Figura 33).



**Figura 32. Vista lateral de las dimensiones del reactor: (Ve) válvula de esfera para control del flujo; (Inf) influente; (Hr) alto de reactor; (Br) ancho de reactor; (Lr) largo de reactor; (Efl) efluente de columna de flotación (elaboración propia).**

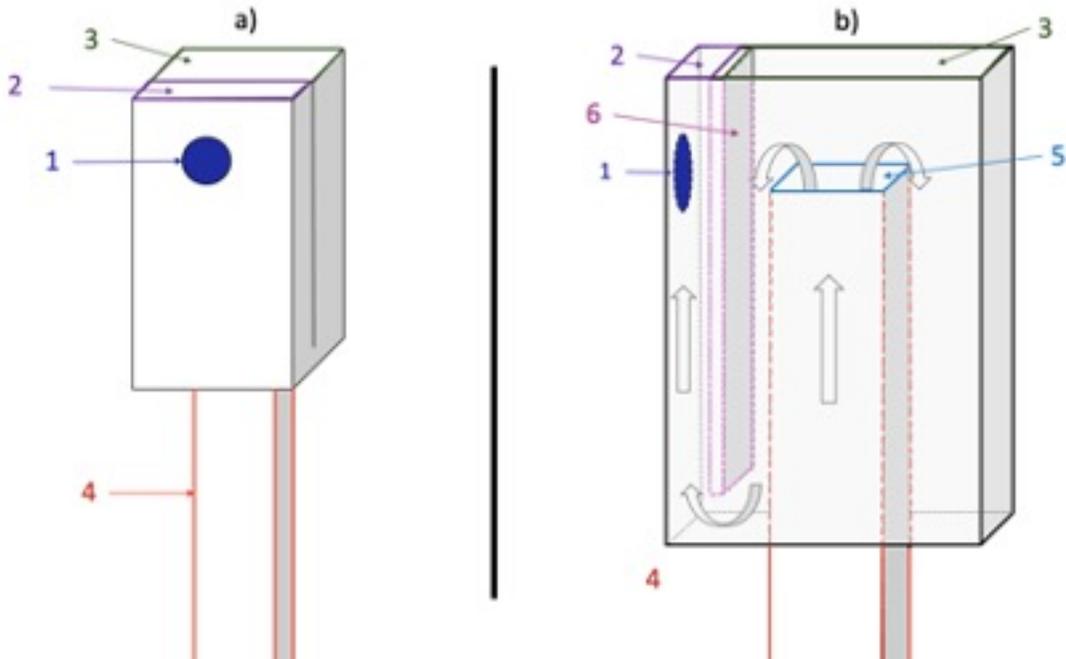


**Figura 33. Vista superior del reactor. (Da) dentado de acrílico para separación de electrodos; (Se) separación entre electrodos; (Br) ancho de reactor; (Lr) largo de reactor; (Ea) espesor de acrílico (elaboración propia).**

### 8.3.2 Desnatador

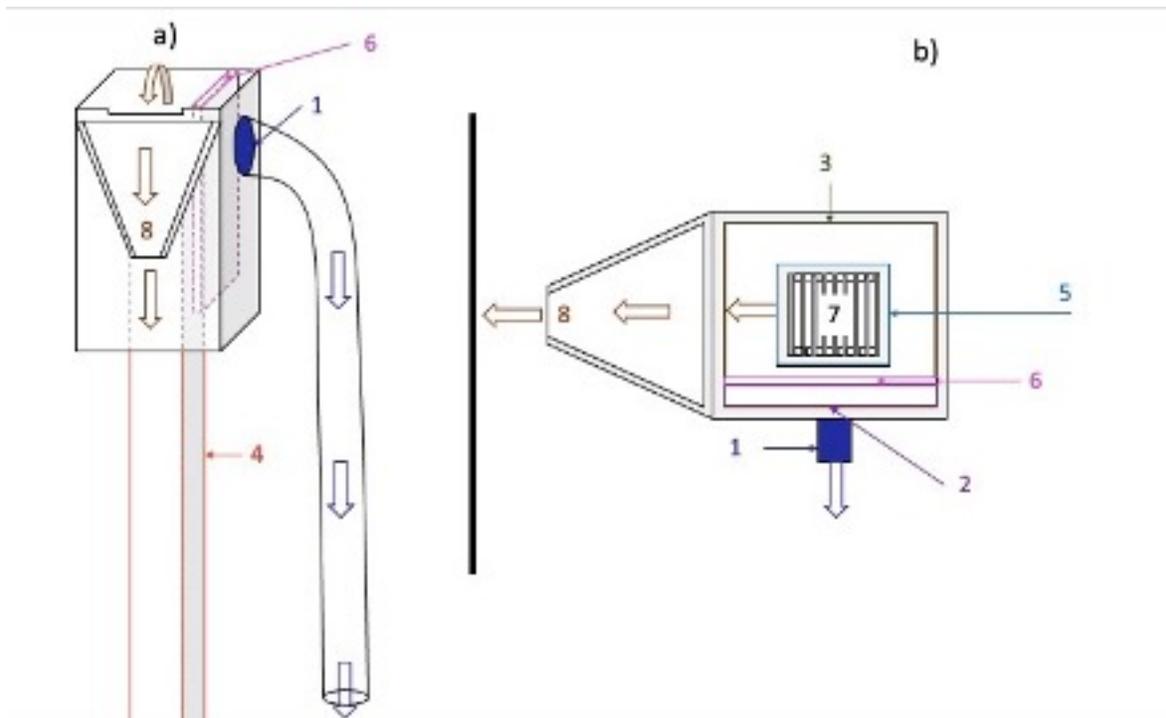
En un proceso de ECF para la remoción de microalgas se genera espuma, la cual está formada por las algas atrapadas por el coagulante generado en las reacciones electroquímicas, y se concentra en la superficie del líquido. La separación de esta espuma es fundamental para el buen funcionamiento del reactor (Parmentier *et al.*, 2020; Landels *et al.*, 2019). Por ello se fabricó un desnatador con dos cámaras: 1) con 0.29 m de alto, 0.16 m de largo y 0.13 m de ancho; 2) de 0.29 m de alto, 0.13 m de largo y 0.02 m de ancho. Dicho desnatador fue colocado a 0.9 m de altura desde el fondo del reactor.

Ambas cámaras fueron separadas entre sí por medio de una pared de acrílico, con el fin de impedir el arrastre de los flocs y la espuma al efluente (ver Figura 34).



**Figura 34. Diseño de desnatador; a) vista exterior frontal y b) detalles del interior (vista lateral). (1) efluente de reactor; (2) segunda cámara de desnatador; (3) primera cámara de desnatador; (4) columna de flotación; (5) efluente de columna de flotación; (6) pared de separación en acrílico (elaboración propia).**

A dicho desnatador se le agregó un canalizador de espuma el cual tenía como intención dirigir el exceso de la misma hacia un punto de recolección externo de manera continua (ver Figura 35).



**Figura 35. Canalizador de espumas (en concordancia con Figura 34): a) vista lateral; b) vista superior; (1) efluente de reactor; (2) segunda cámara de desnatador; (3) primera cámara de desnatador; (4) columna de flotación; (5) efluente de columna de flotación; (6) pared de separación en acrílico; (7) electrodos dentro de columna de flotación; (8) recorrido de espuma (elaboración propia).**

### 8.3.3 Electrodo

Los electrodos fueron fabricados con una placa de aluminio comercial calibre 18 (1.25 mm de espesor); cada electrodo cuenta con un ancho ( $B_a$ ) de 0.045 m y una altura ( $h$ ) variable dependiendo de los valores de densidad de corriente correspondientes.

De acuerdo con los valores de densidad de corriente y amperaje establecidos en Tabla 10, el área activa de electrodos fue definida por la Ecuación 15:

$$a_a = \frac{I}{i} = \left(\frac{A}{1}\right) \left(\frac{m^2}{A}\right) = m^2 \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:  $a_a$  es el área activa de electrodos ( $m^2$ );  $I$  es la intensidad de corriente que fluye a través del área activa del electrodo ( $A$ ); e  $i$  es la densidad de corriente aplicada ( $A/m^2$ ).

La altura del electrodo fue calculada por medio de la Ecuación 16:

$$h = \frac{a_a}{((N_e - 1) * Ba)} = \left(\frac{m^2}{1}\right) \left(\frac{1}{m}\right) = m \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:  $Ba$  es el ancho del electrodo ( $m$ );  $N_e$  es el número de electrodos; y  $h$  es la altura resultante del electrodo ( $m$ ).

Para realizar el cálculo de la altura de cada juego de electrodos, primero fue necesario plantear una cantidad específica de los mismos (en este caso 9), que cumplieran con los valores de densidad de corriente propuestos; esto sin dejar de lado que de acuerdo con la teoría de la ECF, las caras externas del electrodo inicial y final ( $C_e$ ), carecen de actividad electrolytica. Por ello se destaca la resta de  $N_e - 1$  (número de electrodos menos uno), lo cual deja 8 caras activas, mismas que componen el área activa del sistema ( $a_a$ ). Cabe destacar que el área activa está conformada sólo por los ánodos de sacrificio ( $a_x$ ), no por los cátodos ( $c_x$ ), tal y como se muestra en la Figura 36.

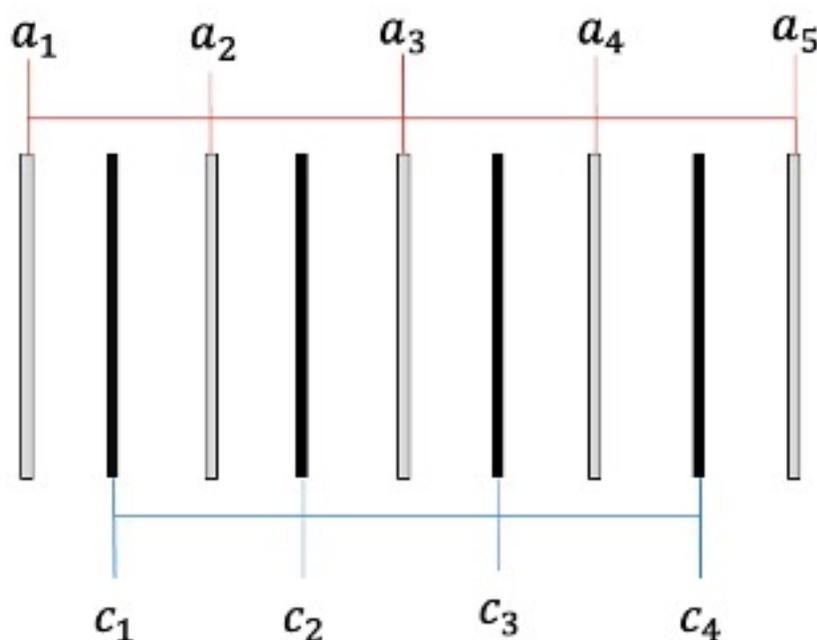
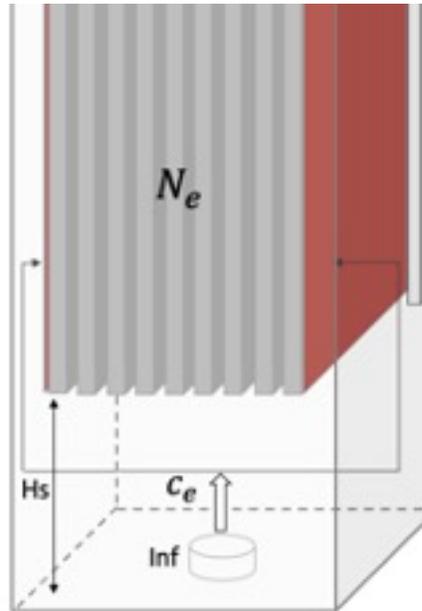


Figura 36. Arreglo de electrodos en reactor ECF:  $a_x$ : ánodos de sacrificio;  $c_x$ : cátodos (elaboración propia).

Para el diseño de experimentos se utilizaron cinco juegos de electrodos de alturas diferentes, cada uno incluía nueve electrodos. Las alturas dependieron del amperaje y de la densidad de corriente establecidos por el experimento (ver Tabla 10).

Previendo que parte de los flocs producidos durante la oxidación de los electrodos de sacrificio, sedimenten en lugar de flotar (Hossein *et al.*, 2011; Essadki *et al.*, 2008), se dejó una altura de sedimentación ( $H_s$ ) de 6 cm debajo de los electrodos (ver Figura 37).



**Figura 37. Esquema de la zona inferior de columna de ECF: (Inf) influente; ( $H_s$ ) altura de sedimentación; ( $C_e$ ) caras externas de electrodos inicial y final; ( $N_e$ ) número de electrodos (elaboración propia).**

## 9 PRUEBAS DE FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Una vez propuesto un diseño preliminar del dispositivo experimental, se realizaron pruebas que abarcaron la evaluación de su desempeño hidráulico, fisicoquímico y eléctrico, a fin de identificar si sus componentes son compatibles con los alcances visualizados en este trabajo de investigación.

### 9.1 HIDRÁULICAS

#### 9.1.1 Descripción

Se aplicaron pruebas de trazadores (ver sección 5.6.3.3), con el objetivo de:

- Contrastar el tiempo de residencia hidráulico teórico y real, mediante el uso de cloruro de sodio (NaCl) como trazador.
- Evidenciar el comportamiento hidráulico del reactor, a través de la interpretación de la curva de trazador generada con uno de los caudales propuestos en este proyecto.
- Comprender el comportamiento del reactor, con y sin generación de burbujas, mediante el uso de un colorante (azul de metileno) como trazador. (ver Tabla 11).

Las concentraciones de los trazadores fueron de 4 g/L y 5 g/L para la sal y el azul de metileno, respectivamente.

*Tabla 11. Condiciones de operación para prueba de trazadores (elaboración propia).*

Prueba	Trazador	Caudal (L/min)	Amperaje (A)	Altura de electrodos (m)	Objetivo
1	Sal	1.6	N/A	0.19	Verificar tiempo de residencia hidráulica.
2	Colorante	1.6	N/A	0.19	Evaluar comportamiento hidráulico sin la influencia de burbujas.
3	Colorante	1.6	1.43	0.19	Evaluar comportamiento hidráulico con la presencia de burbujas.

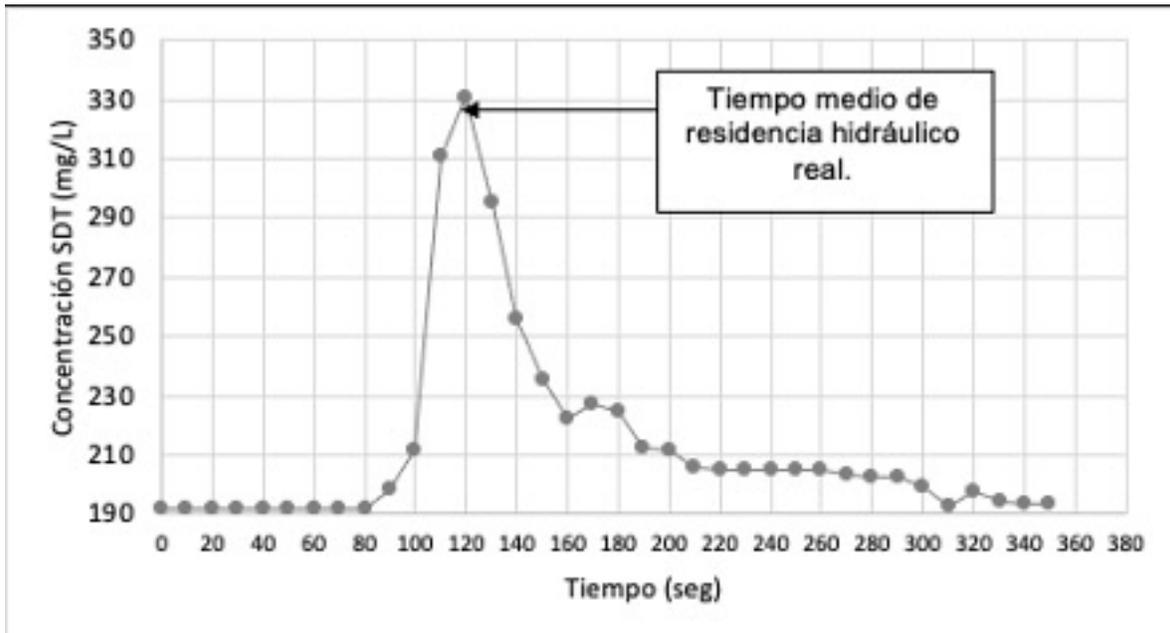
#### 9.1.2 Resultados

Con los resultados de las pruebas de trazadores es posible observar que:

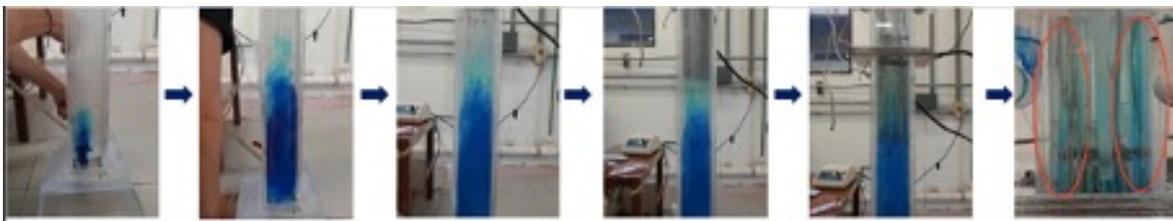
- Al evaluar el tiempo de retención hidráulico real (120 s), se observó un ligero desfase en relación con el teórico (117 s), esto debido a que parte de la masa de agua sufre un retraso dentro del reactor (ver Figura 38).
- El comportamiento del agua, sin la presencia de burbujas, provoca un flujo preferencial (canalizaciones o cortos circuitos) a los costados del reactor, entre la pared y los electrodos (Figura 39).

- El paso de burbujas arriba de los electrodos genera mezclado y evita la presencia de flujos preferenciales (Figura 40).

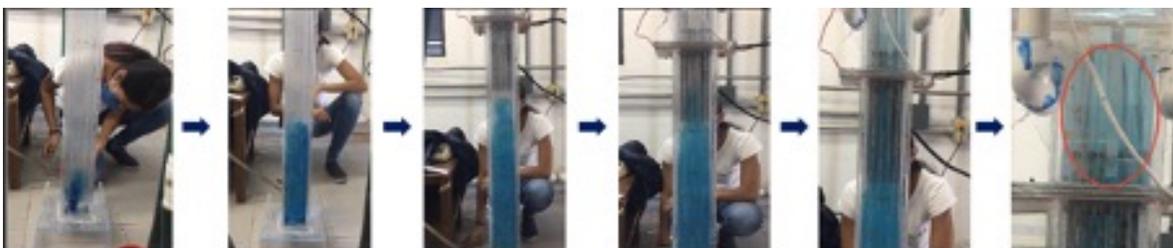
En lo que respecta a los intereses de este trabajo de investigación, el reactor anticipa un adecuado funcionamiento gracias al mezclado provocado por las burbujas generadas en la reacción de hidrólisis, evitando cortos circuitos y zonas muertas en la columna del dispositivo.



*Figura 38. Curva de trazador generada por la técnica de pulso, utilizando NaCl como trazador (Prueba 1) (elaboración propia).*



*Figura 39. Secuencia de imágenes después de la inyección de colorante sin aplicación de corriente eléctrica (Prueba 2) (elaboración propia).*



*Figura 40. Secuencia de imágenes después de la inyección de trazador en presencia de corriente eléctrica (Prueba 3) (elaboración propia).*

## **9.2 ELÉCTRICAS**

### **9.2.1 Evaluación de los electrodos diseñados**

#### **9.2.1.1 Descripción**

Se evaluó el desempeño de los electrodos diseñados, con intención de corroborar que no se llegaba al voltaje máximo permitido por la fuente de poder (20 V).

Para lograr lo anterior se varió la corriente eléctrica entre 0 y 7 A, con intervalos de 0.5 A, con cada juego de electrodos y operando el reactor con uno de los caudales establecidos en el diseño de experimentos elegido al azar (4.3 L/min).

La conductividad eléctrica del agua en esta etapa fue de 190  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (conductividad presente en el agua de pozo que abastece al laboratorio).

#### **9.2.1.2 Resultados**

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que los electrodos de 19 y 5 cm llegan muy cerca del voltaje máximo soportado por la fuente de poder (20 V) con la aplicación de 5 y 1.5 A respectivamente (ver Figura 41), lo que equivale a densidades de corriente de 72 y 79  $\text{A}/\text{m}^2$  respectivamente (ver Figura 42). Esto implica un desempeño deficiente de dichas placas, prediciendo la dificultad para llevar a cabo el diseño de experimentos plasmado en la Tabla 10, lo cual advierte la necesidad de su rediseño.

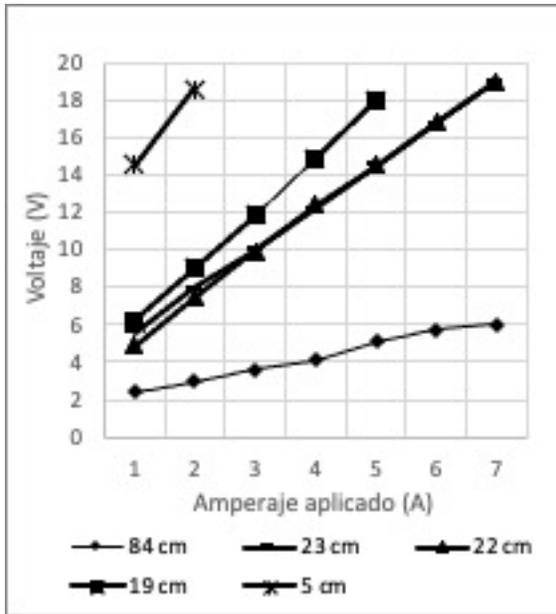


Figura 41. Voltaje límite soportado por cada juego de electrodos (elaboración propia).

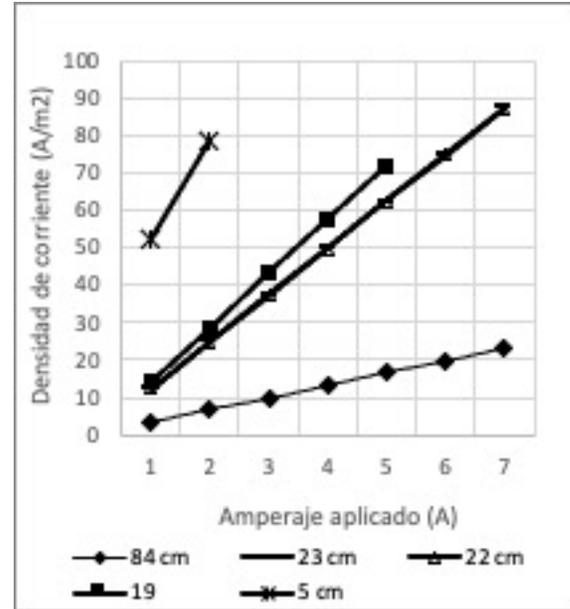


Figura 42. Densidad de corriente límite de cada juego de electrodos (elaboración propia).

## 9.2.2 Evaluación de las conexiones

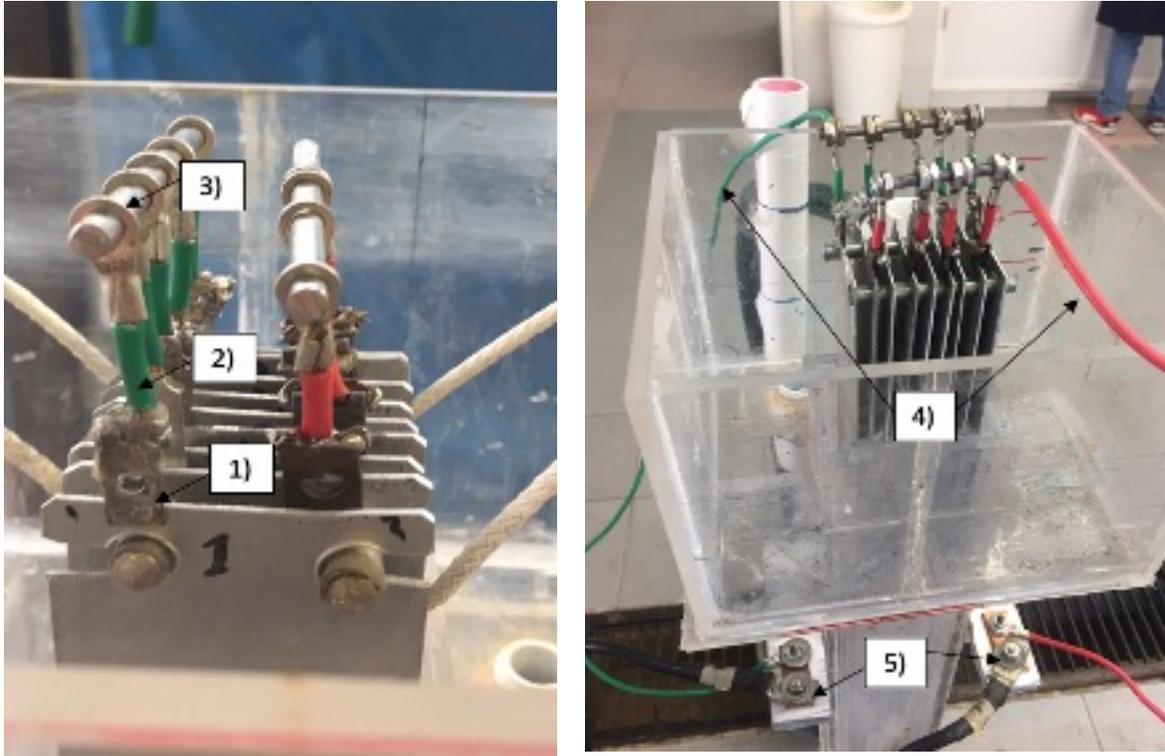
### 9.2.2.1 Descripción

Se realizó el diseño, construcción e implementación de las conexiones eléctricas, las cuales fueron evaluadas en condiciones extremas de amperaje (10 A) a un caudal de 2 L/min (igualmente elegido al azar), verificando:

- Producción homogénea de burbujas por parte de los electrodos.
- Resistencia del cableado al amperaje aplicado.
- Adecuada sujeción entre las conexiones y los electrodos.

### 9.2.2.2 Resultados

Para realizar las conexiones eléctricas se utilizaron dos cables de cobre calibre 12, con un área nominal de 3.31 mm<sup>2</sup>. A manera de prescindir de un exceso de cableado, estos fueron conectados desde la fuente de poder hasta un tornillo de acero inoxidable, el cual aseguraba el paso de la energía hacia pequeños fragmentos de cableado con terminal de “grapa”; cada grapa fue conectada a los electrodos de manera individual (ver Figura 43).



**Figura 43. Conexiones eléctricas. 1) terminal de grapa; 2) fragmento de cableado; 3) tornillo de acero inoxidable; 4) cableado calibre 12'; 5) Conexiones de fuente de poder.**

Al evaluar las conexiones diseñadas, fue posible detectar lo siguiente:

- Deficiencia en la producción de burbujas. Ciertos electrodos no presentaron liberación de gas debido a no estar conectados correctamente.
- Pronta oxidación de las conexiones expuestas a la fase líquida (incluso después de ser barnizadas).
- Complicaciones al realizar la unión de las conexiones con los electrodos.
- Pérdida de la continuidad eléctrica al introducir los electrodos al reactor; cualquier movimiento brusco al momento hacer el montaje del dispositivo, provocaba la desconexión de las placas debido a su débil agarre.

Debido a un comportamiento defectuoso, se rediseñaron las conexiones eléctricas, optando por conexiones de acero inoxidable, atornilladas a los electrodos, de fácil conexión reversible y con un excelente agarre (Figura 44).



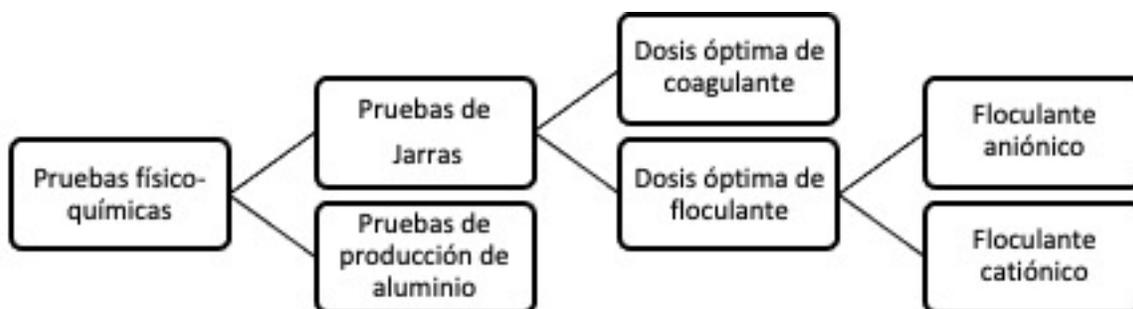
*Figura 44. Conexiones utilizadas para asegurar la continuidad eléctrica en los electrodos.*

### **9.3 FISICOQUÍMICAS**

Estas pruebas preliminares fueron realizadas con el objetivo de:

- Evaluar la eficiencia del aluminio como coagulante para su aplicación en la remoción de microalgas en el agua de estudio.
- Valorar los beneficios de agregar un floculante (polímero) a un proceso de coagulación/floculación química.

La logística de estas pruebas se muestran en la Figura 45.



*Figura 45. Secuencia de ejecución de pruebas fisicoquímicas (elaboración propia).*

### 9.3.1 Prueba de jarras

#### 9.3.1.1 Descripción

Se realizó una prueba de jarras con el agua problema bajo las condiciones mostradas en la Tabla 12, para identificar los alcances de un proceso de coagulación/floculación convencional sobre la remoción de microalgas.

*Tabla 12. Condiciones iniciales de agua con microalgas (elaboración propia).*

Condiciones iniciales			
pH	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Color aparente (U Pt-Co)	Turbiedad (UTN)
7	311	498	41

Se utilizó sulfato de aluminio como sal coagulante ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ). Se preparó una solución madre con una concentración de 3,744 mg/L de Al, de la cual se extrajeron volúmenes de 2.6, 4.2, 5.3, 8 y 10.4 mL, para obtener las concentraciones en jarras de 5, 8, 10, 15 y 20 mg/L respectivamente; en esta prueba se utilizó una jarra blanco (sin coagulante).

El volumen de agua en cada una de las jarras fue de 2 L y las condiciones de prueba se muestran en la Tabla 13.

Una vez terminado el tiempo de sedimentación, se tomó una muestra de agua clarificada de cada una de las jarras y se midieron los parámetros de color aparente y turbiedad, cuyos resultados fueron empleados para determinar la dosis óptima de coagulante.

*Tabla 13. Condiciones de operación en prueba de jarras (elaboración propia).*

Etapa	Velocidad de mezclado (rpm)	Gradiente ( $\text{s}^{-1}$ )	Tiempo
Mezcla rápida (coagulación)	200	354	15 s

**Tabla 13. Condiciones de operación en prueba de jarras (elaboración propia).**

Etapa	Velocidad de mezclado (rpm)	Gradiente (s <sup>-1</sup> )	Tiempo
Mezcla lenta (floculación)	59	60	7 min
	45	40	7 min
	28	20	7 min
Sedimentación	---	---	30 min

Posteriormente se realizó una segunda prueba de jarras para encontrar la dosis óptima de floculante (o polímero). Esta segunda prueba se realizó en dos variantes: una con floculante catiónico y otra con floculante aniónico (Tabla 14). La dosis óptima de coagulante obtenida en la primera prueba fue adicionada en cada una de las 6 jarras. En esta ocasión la variante fue la cantidad de floculante, mismo que fue adicionado inmediatamente después de agregar el coagulante. Las dosis de floculante utilizadas para cada jarra fueron de: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 mg/L, con su respectivo blanco (sin floculante), esto con las mismas condiciones de prueba mencionadas en la Tabla 13.

**Tabla 14. Especificaciones técnicas de floculantes utilizados en prueba de jarras (elaboración propia).**

Especificaciones técnicas del producto		
Nombre	WTS-7250	WTS-40
Carga	Catiónica	Aniónica
Apariencia	Polvo granular blanco	Polvo granular blanco
Carga relativa	Alta	Media

### 9.3.1.2 Resultados

Evaluando los resultados de estas pruebas, fue posible notar lo siguiente:

- La dosis óptima de coagulante fue de 10 mg/L, con una remoción de color y turbiedad de 93.4% y 99.2%, respectivamente (ver Tabla 15).
- Al agregar un polímero catiónico es posible aumentar la remoción de color de 93.4 a 96% y de turbiedad de 99.2 a 99.6 % (Tabla 16).
- Al agregar un polímero aniónico es posible aumentar la remoción de color de 93.4% a 99.2% y de turbiedad de 99.2 a 99.6 %.
- La mayor remoción de color y turbiedad fue obtenida al agregar un polímero aniónico (ver Tabla 17, Figura 47 y Figura 48).

De acuerdo con los resultados obtenidos, la adición de polímeros en una prueba de jarras no genera un aumento significativo en la remoción de color y turbiedad. Sin embargo, ante a la incapacidad de replicar las condiciones de mezclado de esta prueba dentro del reactor diseñado, se optó por adicionar una etapa de floculación, agregando un polímero aniónico en las siguientes corridas experimentales.

Debido al comportamiento parecido de color y turbiedad (ver Figura 46), se optó por prescindir de la evaluación de la turbiedad en las pruebas subsecuentes y conservar sólo la medición de color aparente como indicador indirecto de la presencia de microalgas.

**Tabla 15. Prueba de jarras para encontrar dosis óptima de coagulante (elaboración propia).**

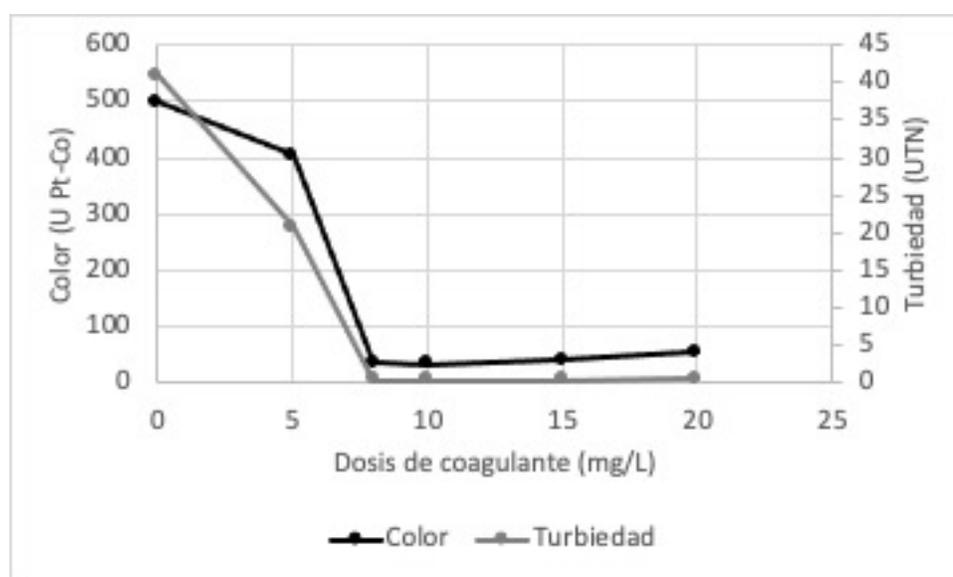
Número de jarra	Dosis de Al <sup>3+</sup>	Color		Turbiedad	
	mg/L	U Pt-Co	% de remoción	UTN	% de remoción
1	0	498	0	41	0
2	5	405	18.7	20.7	49.5
3	8	36	92.8	0.34	99.2
4	10	33	93.4	0.33	99.2
5	15	42	91.6	0.4	99.0
6	20	55	89.0	0.51	98.8

**Tabla 16. Prueba de jarras para encontrar dosis óptima de polímero catiónico, aplicando una dosis de Al<sup>3+</sup> de 10 mg/L (elaboración propia).**

Número de jarra	Dosis de polímero	Color		Turbiedad	
	mg/L	U Pt-Co	% de remoción	UTN	% de remoción
1	0	25	95	0.21	99.6
2	0.2	16	96.8	0.21	99.7
3	0.4	20	96	0.17	99.6
4	0.6	17	96.6	0.19	99.7
5	0.8	18	96.4	0.21	99.6
6	1	18	96.4	0.21	99.6

**Tabla 17. Prueba de jarras para encontrar dosis óptima de polímero aniónico, aplicando una dosis de  $Al^{3+}$  de 10 mg/L (elaboración propia).**

Número de jarra	Dosis de polímero	Color		Turbiedad	
	mg/L	U Pt-Co	% de remoción	Turbiedad (UTN)	mg/L
1	0	26	94.8	0.21	99.5
2	0.2	4	99.2	0.14	99.5
3	0.4	4	99.2	0.13	99.6
4	0.6	6	98.8	0.14	99.5
5	0.8	6	98.8	0.16	99.5
6	1	6	98.8	0.16	99.5



**Figura 46. Resultados de remoción de color y turbiedad en prueba de jarras, para la obtención de dosis óptima de coagulante (elaboración propia).**

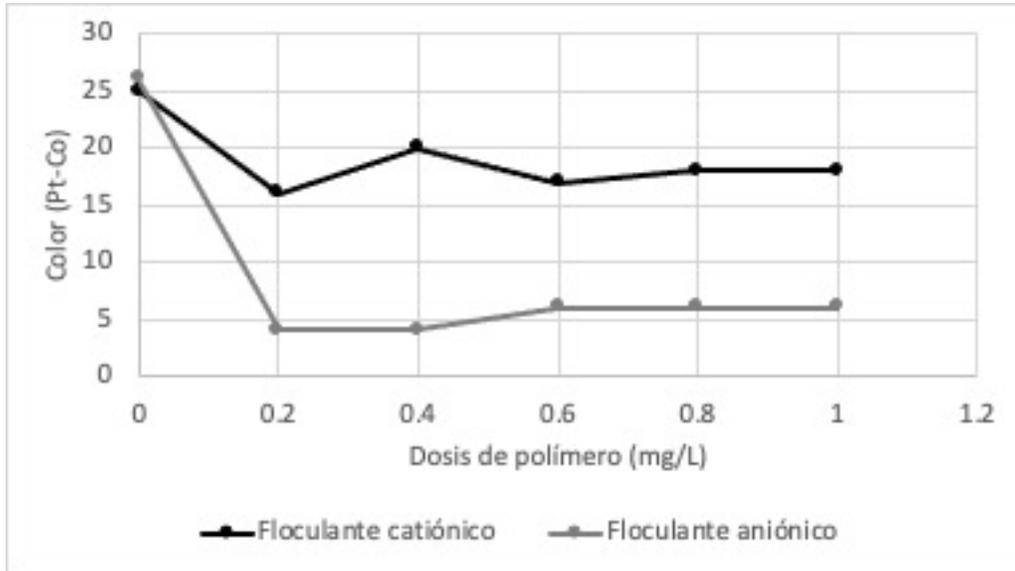


Figura 47. Resultados de la remoción de color en pruebas de jarras, para la obtención de dosis óptima de polímero (elaboración propia).

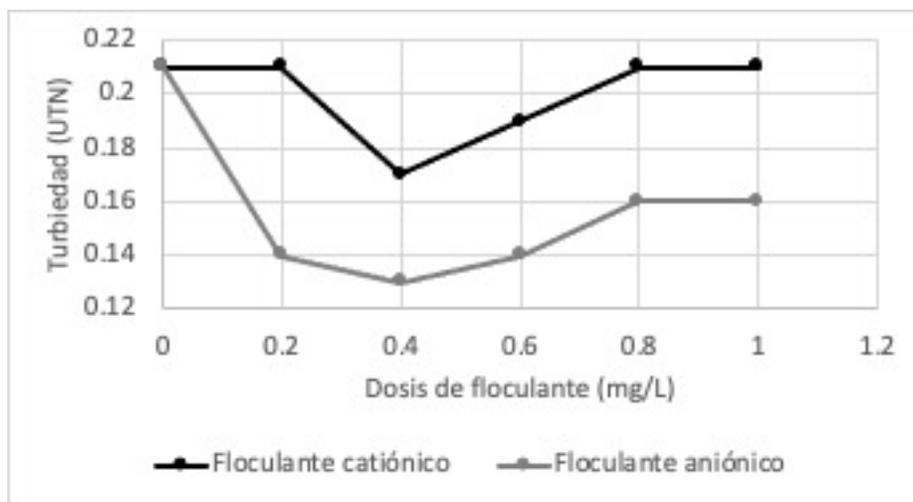


Figura 48. Resultados de la remoción de turbiedad en pruebas de jarras para la obtención de dosis óptima de polímero (elaboración propia).

## 9.3.2 Pruebas de producción de aluminio

### 9.3.2.1 Descripción

Se realizaron pruebas de producción de aluminio por tres razones:

- Constatar una adecuada liberación de aluminio durante la oxidación de los electrodos, de acuerdo con lo calculado teóricamente con la Ecuación 14.
- Conocer la evolución de la producción de aluminio en función del tiempo de operación del reactor, con la finalidad de establecer el tiempo necesario de prueba para los tratamientos que conformarán los diseños experimentales.

Se evaluó cada juego de placas durante 60 minutos de operación. Se tomó una muestra de aluminio cada 15 minutos en el efluente del dispositivo experimental y se contrastó la dosis teórica de aluminio con la dosis real de cada prueba. Esta prueba se realizó con agua de pozo sin presencia de microalgas, con una conductividad de 195  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un pH de 7.01.

### 9.3.2.2 Resultados

Con los resultados obtenidos fue posible identificar:

- La producción de aluminio fue superior al 100% en todas las pruebas (ver Tabla 18).
- El tiempo necesario para que el sistema alcance la máxima producción de aluminio fue mayor a 30 minutos (ver Figura 49).
- Los electrodos de 0.19 y 0.05 m presentaron una demanda de voltaje que impidió continuar con la prueba (ver Figura 49).

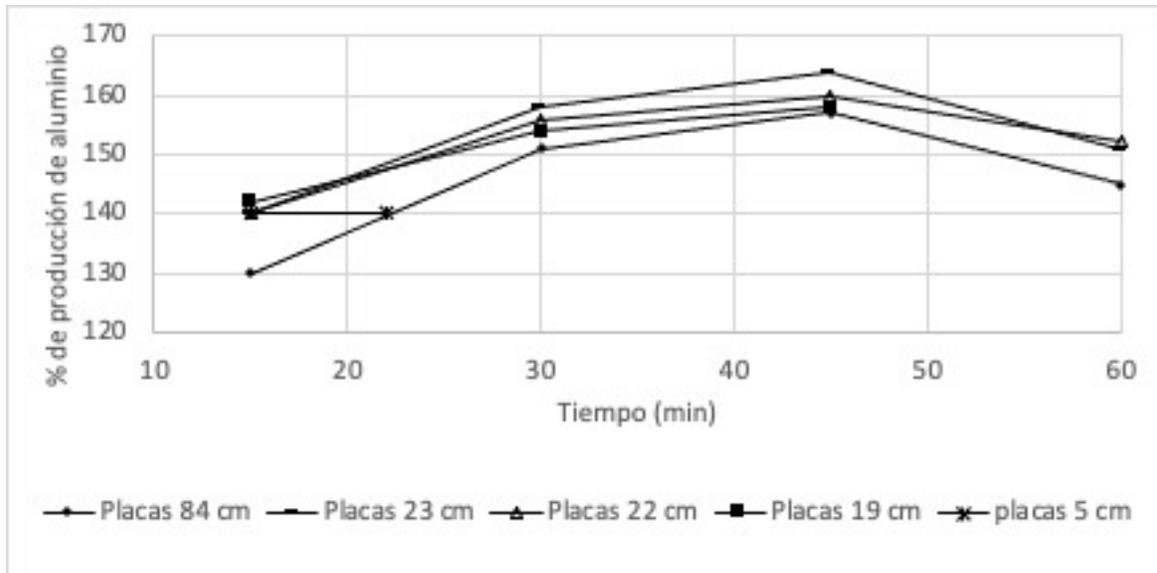
Con respecto a la sobreproducción de aluminio en el medio (Tabla 18) algunos autores han concluido que este fenómeno ocurre debido a la evolución del hidrógeno en el cátodo; dicho fenómeno genera condiciones alcalinas en la periferia del electrodo, lo que genera su corrosión y a la vez su disolución (Wiley *et al.*, 2016; Mouedhen *et al.*, 2008).

Esta sobreproducción es indispensable a tomar en cuenta cuando se tiene como objetivo realizar una evaluación económica precisa del proceso; sin embargo, el análisis de aluminio a la salida de un reactor se vuelve complicado al tratar con agua propensa a formar flocs (agua contaminada, en este caso con microalgas), debido a la necesidad de recuperar los mismos en su totalidad para su análisis (Parmentier *et al.*, 2020). Por esta razón, en este trabajo de investigación se optó por sólo considerar las dosis teóricas con fines comparativos.

**Tabla 18. Resultados de la producción de aluminio en el tiempo (elaboración propia).**

Dosis teórica (mg/L)	Tiempo (min)	Dosis real (mg/L)	Porcentaje de producción
Tamaño de electrodos: 0.84 m			
Caudal: 7 L/min			
3.5	15	4.6	130
3.5	30	5.3	151
3.5	45	5.52	157
3.5	60	5.08	145
Tamaño de electrodos: 0.23 m			
Caudal: 7 L/min			
5	15	7.01	140
5	30	7.9	158
5	45	8.2	164
5	60	8	160
Tamaño de electrodos: 0.22 m			
Caudal: 4.3 L/min			
5	15	7	140
5	30	7.8	156
5	45	8.01	160
5	60	7.9	158
Tamaño de electrodos: 0.19 m			
Caudal: 1.6 L/min			
5	15	7.1	142
5	30	7.9	154
5	45	7.7	158
Tamaño de electrodos: 0.05 m			
Caudal: 1.6 L/min			
5	15	7	140
5	22	7	140
No se pudo continuar con la prueba debido a que se llegó al límite de voltaje que soporta la fuente de poder.			

En cuanto a la determinación del tiempo de prueba, desde el minuto 15 la producción de aluminio está por encima del 100%, se agregaron 5 minutos más por seguridad y se estableció un tiempo de prueba de 20 minutos.



*Figura 49. Porcentaje de producción de aluminio respecto a la producción teórica de los diferentes tamaños de electrodos (elaboración propia).*

Otro aspecto a tomar en cuenta es la necesidad del rediseño de los electrodos de 0.05 y 0.19 m, debido a que éstos llegan al voltaje máximo permitido por la fuente de poder (20 V).

## 9.4 DE CONFIGURACIÓN DEL REACTOR

### 9.4.1 Descripción

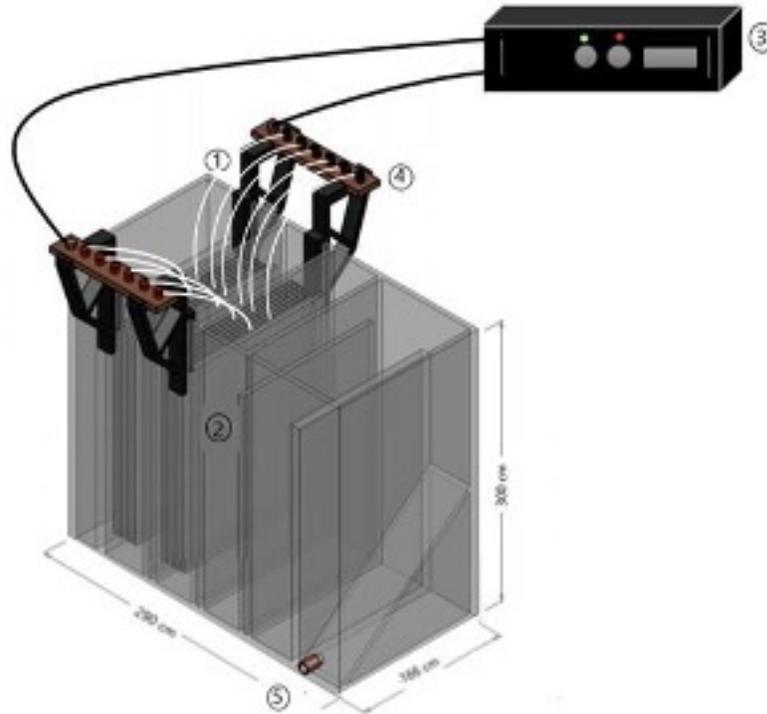
Para modificar el dispositivo experimental, se evaluó su configuración de la siguiente manera:

- Comparando su funcionamiento contra un reactor de tipo horizontal (FH).
- Invertiendo el flujo de ascendente (FVA) a descendente (FVD).

El reactor de flujo horizontal (FH) es un dispositivo con un recorrido en serpentin provocado por su división en 6 compartimientos. Dicho recorrido favorece el proceso de floculación y por ende, el aumento del tamaño de los flocs; sin embargo, su poca distancia libre sobre electrodos disminuye el efecto de las burbujas provocadas por la hidrólisis, reduciendo su eficiencia de remoción por flotación. Bajo esta configuración, el mecanismo de remoción por excelencia es la sedimentación.

Este reactor fue fabricado de acrílico cristal de 8 mm de espesor, dividido en 6 cámaras, con un volumen total de 7 L, 12 electrodos conformados por placas rectangulares de aluminio (0.145 m de ancho x 0.2 m de largo x 0.001 m de

espesor) y con una distancia de separación entre ellos de 0.005 m. Dicho reactor (Figura 50) fue elaborado y evaluado por un estudio previo denominado “Evaluación del tipo y densidad de microalgas, así como de las variables de operación, en la eficiencia de sistemas electroquímicos de potabilización” (Ruiz, 2021).

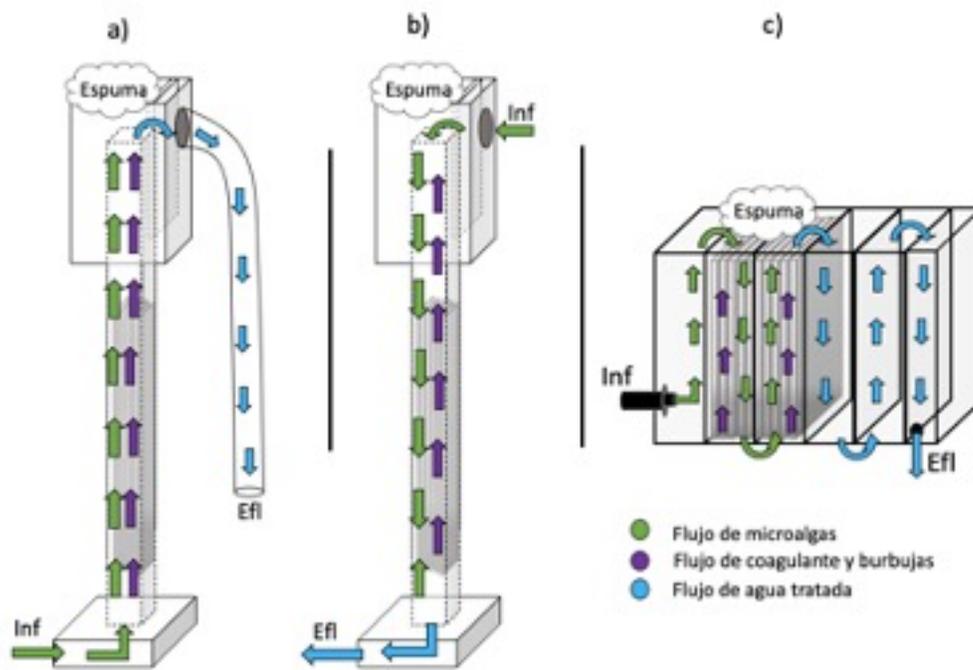


**Figura 50. Reactor de flujo horizontal (FH): 1) entrada de agua; 2) electrodos de sacrificio; 3) fuente de poder; 4) conexiones eléctricas; 5) salida de agua. Imagen tomada de Ruiz, 2021.**

En un reactor de flujo vertical descendente (FVD), el recorrido de las microalgas es opuesto al del coagulante y las burbujas, lo que provoca el choque entre éstos, generando un evidente mezclado capaz de favorecer la coagulación por neutralización; sin embargo, su breve interacción impide la generación de flocs de gran tamaño y además, reduce la eficiencia del proceso de flotación por burbujas.

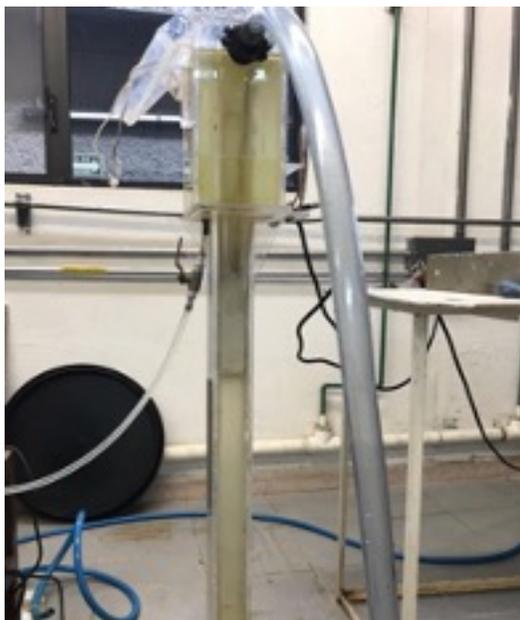
En un reactor de flujo vertical ascendente (FVA), la interacción entre las burbujas y los flocs dura más tiempo que en un FVD, lo que potencializa la neutralización de las microalgas para su posterior remoción por flotación.

En teoría, en un sistema FH, parte de las microalgas se retienen en la espuma generada por flotación y parte son llevadas al efluente en forma de flocs para su posterior sedimentación, mientras que en configuraciones verticales (FDV y FVA), las microalgas tienen mayor afinidad a ser retenidas en la espuma, lo que reduce su salida en el efluente tratado (ER) (ver Figura 51).

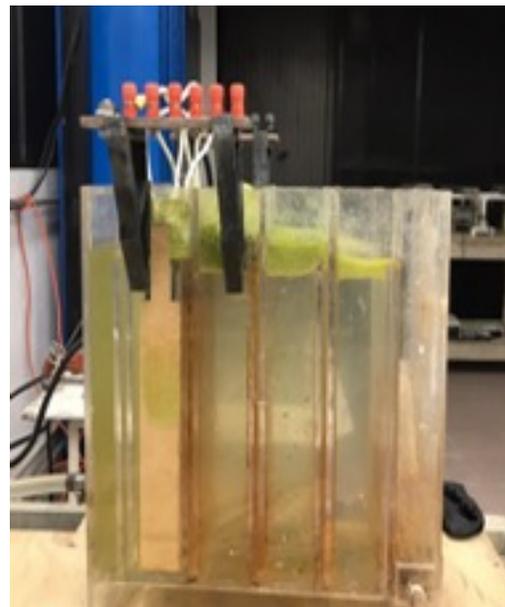


**Figura 51. Dinámica de los componentes en las 3 configuraciones analizadas. a): flujo vertical ascendente (FVA); b) flujo vertical descendente (FVD)); c) flujo horizontal (FH). Inf: influente; Efl: Efluente (elaboración propia).**

E la Figura 52 y en la Figura 53 se muestran los dispositivos utilizados.



**Figura 52. Reactor de configuración vertical (vista frontal).**



**Figura 53. Reactor de configuración horizontal (vista lateral).**

Estas pruebas se realizaron con los objetivos de:

- Entender el mecanismo principal de remoción de las algas (flotación o sedimentación).
- Comparar la eficiencia del reactor en flujo vertical y horizontal.
- Visualizar la dinámica de las espumas generadas en cada uno de los dispositivos.

Para lograr esto se utilizaron dos diferentes tipos de agua problema (ver Tabla 19) y en cada una de las pruebas se fijaron condiciones de operación lo más similares posibles entre sí, para evaluar estrictamente el desempeño de cada reactor con base a su configuración (ver Tabla 20). En esta etapa del proyecto se ajustó el pH a 6, considerando que un valor ligeramente ácido es más eficiente para remover microalgas en un sistema de ECF (Parmentier *et al.*, 2020; Barros *et al.*, 2015; Golzary *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2010).

**Tabla 19. Condiciones iniciales del agua en las pruebas de evaluación de reactor (elaboración propia).**

Prueba	pH	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	Color (U Pt-Co)
1a	6	324	644
2a	6	319	563

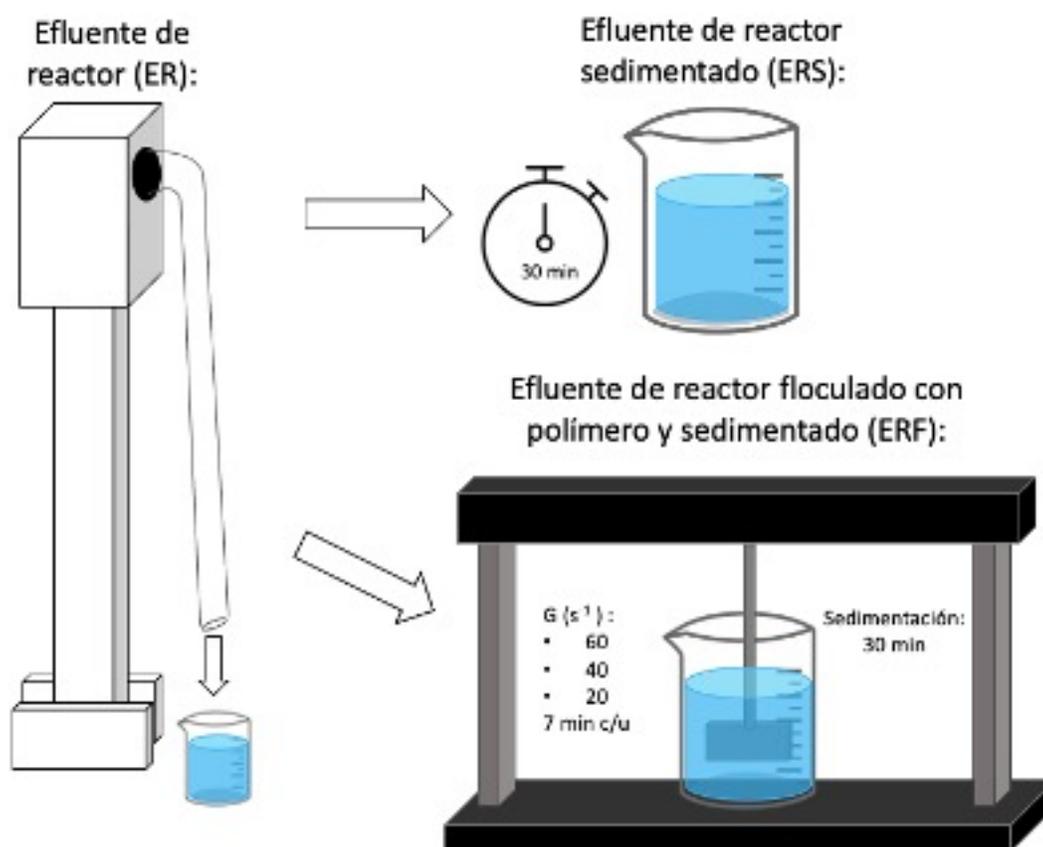
Para evaluar el desempeño de cada configuración (FH, FVA y FVD), se utilizó el parámetro de color aparente como respuesta. Dicha respuesta fue monitoreada en tres escenarios, los cuales se describen a continuación:

- a) En el efluente del reactor (ER). Inmediatamente a la salida del dispositivo se tomó una muestra, con el objetivo de conocer la capacidad neta del reactor para clarificar el agua.
- b) En el efluente sedimentado del reactor (ERS). Una vez tomada la muestra en el efluente del reactor (ER), parte de esta se dejó sedimentar durante 30 minutos, con el fin de conocer la capacidad del reactor para generar flocs sedimentables.
- c) Efluente de reactor sometido a floculación con polímero y posterior sedimentación (ERF). Una muestra del efluente del reactor (ER) se introdujo en una jarra, se le aplicó floculante aniónico (0.4 mg/L), se sometió a mezclado lento en tres etapas con diferentes gradientes de velocidad (60, 40 y 20  $\text{s}^{-1}$ ), y posteriormente a una etapa de sedimentación por 30 minutos. El objetivo de esta prueba fue comprobar si al agregar un floculante se aumentaba la eficiencia. En esta etapa se omitió la mezcla rápida para evitar el rompimiento de los flocs previamente formados dentro del reactor.

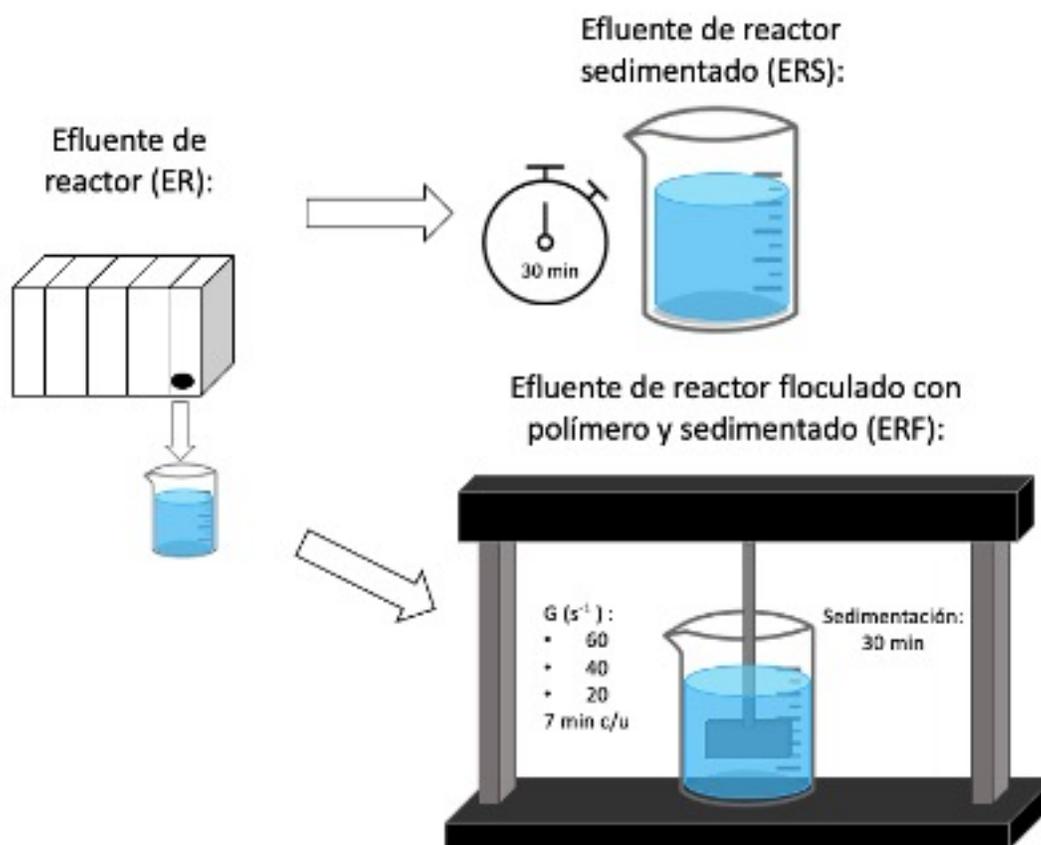
**Tabla 20. Condiciones de operación para cada configuración de reactor (elaboración propia).**

Configuración	Caudal (L/min)	Velocidad entre placas (m/s)	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	Amperaje (A)	Coagulante teórico (mg/L)
Flujo horizontal (FH)	2	0.03	25	7.15	20
Flujo vertical ascendente (FVA)	0.4	0.04	23	1.43	20
Flujo vertical descendente (FVD)	0.4	0.04	23	1.43	20

En la Figura 54 se indican las etapas de evaluación del reactor a flujo vertical ascendente, pero para el flujo vertical descendente sería igual, solo que la muestra se recolectaría de la parte inferior del reactor. La Figura 55 muestra las etapas del flujo horizontal.



**Figura 54. Descripción de las tres etapas de evaluación del agua tratada en el reactor con configuración vertical (elaboración propia).**



*Figura 55. Descripción de las tres etapas de evaluación del agua tratada en el reactor con configuración horizontal (elaboración propia).*

#### 9.4.2 Resultados

Con los resultados obtenidos al evaluar la configuración del reactor (Tabla 21 y Figura 56), fue posible concluir lo siguiente:

- Ambas concentraciones de algas dan los mismos resultados, con poca diferencia en las eficiencias obtenidas.
- Una configuración FH, en promedio, remueve el 31% de color en ER; 94 % en ERS y, 99.5 % en ERF.
- La configuración FVA, tiene un promedio de remoción de 69.5 % en ER; 84% en ERS y, un 95% en ERF.
- Cuando el reactor tiene una configuración FVD, su promedio de remoción en ER es de 54.5 %, 73 % en ERS y, 75.5% en ERF.
- La eficiencia de remoción de color aparente a la salida del reactor (ER) es más elevada en el FVA , seguida del FVD y por último el FH.

- En el efluente sedimentado (ERS) se obtienen mejores resultados con el FH, después el FVA y por último el FVD.
- Al flocular y sedimentar el efluente del reactor (ERF), la mejor configuración es el FH, seguido del FVA y finalmente FVD.

Estos resultados pueden explicarse de la siguiente manera:

- Un elevado color en la salida del reactor se debe al arrastre de los flocs hacia el efluente. Esto sucede principalmente en la configuración horizontal (FH), donde el color en el efluente (ER) es superior al observado en las dos otras configuraciones (FVD y FVA).
- La configuración de reactor en horizontal (FH) es capaz de formar flocs de mayor tamaño que sedimentan mejor en comparación con la configuración vertical (tanto ascendente como descendente).
- Adicionar polímero aumenta el porcentaje de remoción de color en las tres configuraciones.
- Aunque en diferente medida, en las tres configuraciones analizadas existe arrastre de flocs hacia el efluente a la salida del reactor, por lo tanto se requiere una etapa adicional de floculación-sedimentación.

Por lo tanto, un reactor de flujo horizontal promueve la remoción de microalgas por sedimentación, mientras que reactores verticales fomentan la remoción por flotación; sin embargo, una configuración FVD genera mayor remoción que uno FVA, demostrando que la dinámica de las burbujas es un factor indispensable a considerar.

Es importante señalar que, al igualar la densidad de corriente y la dosis de coagulante, fue posible aislar los efectos de las diferentes configuraciones planteadas sobre un proceso de remoción de microalgas. Esto permitió observar que, a pesar de que una configuración en horizontal se muestra bastante eficiente al utilizar procesos adicionales como floculación y sedimentación con polímero (ERF) o simple sedimentación (ERS), esta configuración presenta una pobre dinámica de burbujas, lo que desencadena en una deficiente remoción en el efluente del reactor (ER) (ver Tabla 21).

Debido a esto, en este trabajo de investigación se decidió enfocarse en una estructura de reactor vertical, específicamente de tipo ascendente (FVA), con el objetivo de aprovechar la actividad de las burbujas y mejorar la remoción de microalgas a la salida del reactor, tratando de evitar agregar segundas etapas al proceso (ERS y ERF).

En la Figura 57 y la Figura 58, se puede apreciar la dinámica de acumulación de espuma en cada configuración.

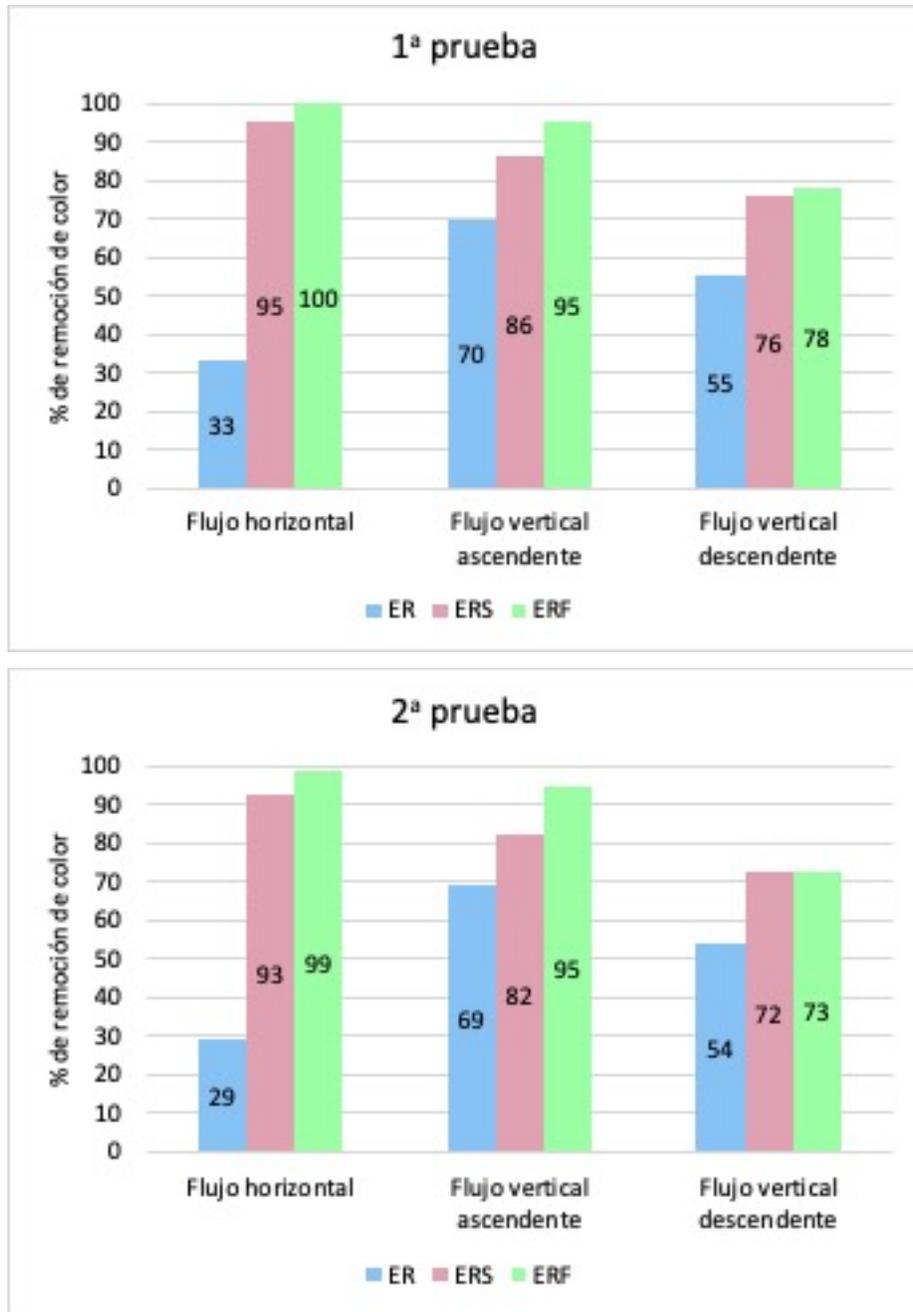
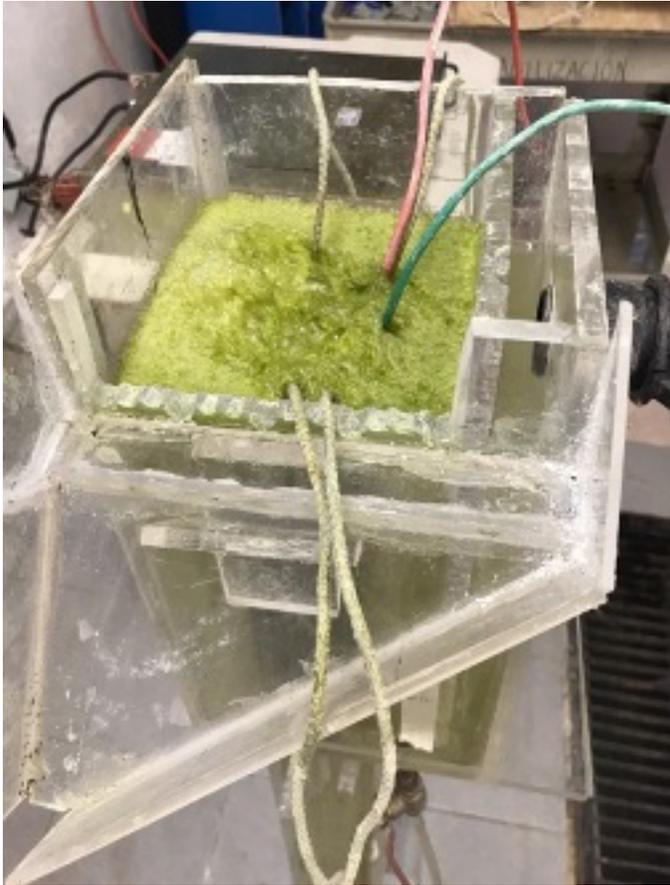


Figura 56. Remoción de color aparente en las diferentes configuraciones (elaboración propia).

**Tabla 21. Remoción de color aparente con un proceso de ECF en diferentes configuraciones de flujo (elaboración propia).**

Configuración	1ª prueba						2ª prueba					
	ER		ERS		ERF		ER		ERS		ERF	
	Color											
	U Pt-Co	%R	U Pt-Co	%R	U Pt-Co	%R	U Pt-Co	%R	U Pt-Co	%R	U Pt-Co	%R
Flujo horizontal (FH)	430	33	27	95	0	100	398	29	41	93	8	99
Flujo vertical ascendente (FVA)	187	70	84	86	26	95	172	69	101	82	30	95
Flujo vertical descendente (FVD)	285	55	150	76	140	78	258	54	155	72	153	73

%R= Por ciento de remoción



*Figura 57. Acumulación de espuma en una configuración vertical en operación (vista superior).*



*Figura 58. Acumulación de espuma en una configuración horizontal en operación (vista superior).*

## 9.5 CONCLUSIONES DE PRUEBAS PRELIMINARES

Dados los resultados de las pruebas preliminares, en las que se observó que el flujo vertical ascendente tiene mejores eficiencias si se compara la remoción de color a la salida del reactor, se decidió enfocar este trabajo a mejorar el proceso ECF para la remoción de microalgas por flotación y no por sedimentación. Para esto, según la literatura (Parmentier *et al.*, 2020; Rojas *et al.*, 2018; Moussa *et al.*, 2016; Essadki *et al.*, 2008), resulta imprescindible mejorar las condiciones de mezclado dentro del sistema, provocadas por el desorden en las moléculas de la fase gaseosa principalmente. Este mezclado ayuda a lo siguiente:

- 1) Generar una adecuada desestabilización del contaminante (microalgas), para que los flocs formados por la disolución del aluminio colisionen con las burbujas producidas en la reacción electroquímica, las cuales están cargadas negativamente (Parmentier *et al.*, 2020; Rojas *et al.*, 2018; Essadki *et al.*, 2008). Este fenómeno de coalición, a su vez, necesita la correcta manipulación de los siguientes parámetros:
  - pH. Un óptimo valor permite la formación de especies coagulantes dentro del seno del líquido con carga positiva, capaces de reaccionar con las cargas negativas del contaminante (microalgas).
  - Dosis de coagulante. Se requiere la dosis adecuada para generar la desestabilización de las microalgas (Moussa *et al.*, 2016; Hendricks, 2011).
- 2) Generar el mayor número de colisiones entre los flocs y las burbujas. Cuanto mayor sea el número de burbujas y su tiempo de interacción, mayor será la tasa de colisiones; para ello es necesaria la producción de burbujas pequeñas (entre 40 y 60  $\mu\text{m}$ ), y evitar la presencia de macroburbujas (mayores a 150  $\mu\text{m}$ ). Esto es posible considerando la manipulación de las siguientes variables:
  - Densidad de corriente. Un valor óptimo permite una adecuada distribución del coagulante, así como del número y tamaño de las burbujas (Issaoui *et al.*, 2019; Rojas *et al.*, 2018; Alam *et al.*, 2017; Da Cruz *et al.*, 2015; Liuyi *et al.*, 2014).
  - Distancia de acenso (Altura libre sobre electrodos). Al prolongar la distancia desde la salida de los electrodos hasta el efluente, el tiempo de interacción entre los flocs y las burbujas será mayor, mejorando la dinámica dentro del reactor; sin embargo, una distancia demasiado elevada puede provocar la coalescencia de las burbujas y por ende la presencia de macroburbujas.

Considerando los puntos anteriores, se tomó la decisión de realizar ciertos cambios al dispositivo propuesto inicialmente y modificar el diseño de experimentos, de la siguiente forma:

- 1) Diseñar electrodos que no comprometan el límite de voltaje soportado por la fuente de poder (20 V), esto a través de una adecuada densidad de corriente.

- 2) Ubicar los electrodos al fondo del reactor, dejando que la altura libre sobre lo mismos dependa de sus dimensiones, la cual a su vez estará determinada por la densidad de corriente.
- 3) Involucrar la dosis de coagulante como variable de estudio, con el propósito de asegurar una adecuada desestabilización de las microalgas.
- 4) Integrar el *pH* en el diseño de experimentos, para analizar su influencia en la formación de las especies coagulantes.

## 10 REPLANTEAMIENTO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

### 10.1 VARIABLES DE ESTUDIO

Para esta nueva etapa se fijaron 3 variables de estudio para un diseño de experimentos  $2^3$  con cuatro puntos centrales: densidad de corriente (factor A), dosis de coagulante (factor B) y pH (factor C). Los niveles de dichas variables fueron seleccionados bajo el criterio proporcionado por los resultados de las pruebas preliminares (sección 8) y por la literatura consultada (ver Tabla 22); los valores de dichas variables se proponen a continuación:

Densidad de corriente: Como ya se mencionó anteriormente, los valores de densidad de corriente plasmados por diferentes autores en un proceso de ECF están entre 5 y 150 A/m<sup>2</sup> (Parmentier *et al.*, 2020; Landels *et al.*, 2019; Golzary *et al.*, 2015; Kyoohan *et al.* 2015; Bajerle *et al.*, 2014; Liyui *et al.*, 2014). Para este grupo de pruebas se fijó el nivel +1 como 60 A/m<sup>2</sup> y para el nivel inferior (-1) en 24.5 A/m<sup>2</sup>. Este intervalo permitió diseñar electrodos que no comprometieran el límite máximo de voltaje (20 V) de la fuente de poder.

Dosis de coagulante: En las pruebas preliminares se había manejado 10 mg/L como dosis óptima para la remoción de microalgas, por ello se utilizó este valor como el nivel -1 en el replanteamiento de la matriz de diseño, mientras que el nivel +1 fue establecido como 25 mg/L para ampliar el intervalo de evaluación y estar en concordancia con estudios recientes realizados en la misma línea de investigación (Ruiz, 2021).

pH: Tal y como lo mencionan ciertos autores, un valor adecuado de pH en un proceso de ECF está entre el neutro y ácido (Ruiz, 2021; Parmentier *et al.*, 2020; Golzary *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2010). De acuerdo con lo realizado por Ruiz (2021), un pH de 6 asegura eficiencias en la remoción de microalgas de hasta el 99%. Para esta etapa de la investigación se estableció un nivel mínimo (-1) de pH de 5.5 y un valor máximo (+1) de 9, con intención de explorar el efecto del pH en un intervalo más amplio.

**Tabla 22. Tabla de diseño de experimentos  $2^3$  (elaboración propia).**

Variables de diseño	Niveles		
	-1	0	1
<b>A:</b> Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	24.5	42.25	60
<b>B:</b> Dosis de aluminio (mg/L)	10	17.5	25
<b>C:</b> pH	5.5	7.25	9

Dicho diseño generó un total de 12 experimentos, los cuales se llevaron a cabo de manera aleatoria para disminuir el efecto de errores sistemáticos durante la experimentación.

## 10.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Una vez establecidas las variables del diseño y su rango de estudio, se obtuvieron nuevas condiciones de operación del reactor (ver Tabla 23).

Fijando un caudal de 2 L/min y de acuerdo con la Ecuación 14, se calculó el amperaje necesario para obtener las dosis de coagulante plasmadas en la Tabla 22.

Cada corrida duró 20 minutos, tiempo considerado como adecuado de acuerdo con lo planteado por las pruebas preliminares de este proyecto (ver sección 9.3.2). Utilizando la Ecuación 13 se calculó el volumen de agua necesario por prueba, obteniéndose un total 480 L para llevar a cabo los 12 experimentos.

*Tabla 23. Variables de estudio y operación del nuevo diseño de experimentos (elaboración propia).*

Experimento	Orden de experimentación	Variables del diseño sin codificar			Variable de operación
		A: Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	B: Dosis de aluminio (mg/L)	C: pH	I: corriente aplicada (A)
1	8	24.5	10	5.5	3.62
2	7	60	10	5.5	3.62
3	5	24.5	25	5.5	9.05
4	1	60	25	5.5	9.05
5	4	24.5	10	9.0	3.62
6	11	60	10	9.0	3.62
7	3	24.5	25	9.0	9.05
8	9	60	25	9.0	9.05
9	2	42.25	17.5	7.25	6.34
10	10	42.25	17.5	7.25	6.34
11	6	42.25	17.5	7.25	6.34
12	12	42.25	17.5	7.25	6.34

## 10.3 MODIFICACIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Una vez establecidas las condiciones de operación, se procedió a realizar la modificación de los siguientes componentes del reactor:

- Área total de ánodos
- Altura de electrodos
- Altura libre sobre electrodos

El área de ánodos se definió de acuerdo con lo plasmado en la Ecuación 15, tomando en cuenta los valores de densidad de corriente e intensidad de corriente establecidos en la matriz del diseño de experimentos.

Una vez calculada dicha área (para cada experimento), se realizó el cálculo de la altura de los electrodos (Ecuación 16).

Tal y como se menciona en la sección 9.5, para cada una de las corridas experimentales, se decidió ubicar los electrodos al fondo del reactor, por lo tanto, la altura libre sobre los electrodos ( $A'$ ) para cada juego, fue definida por la Ecuación 17:

$$A' = hr - h$$

*Ecuación 17*

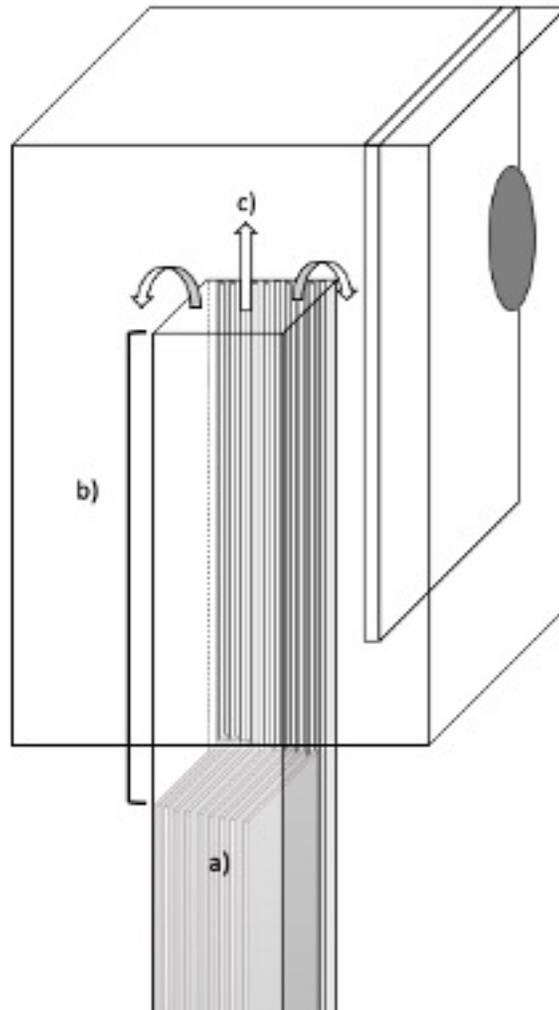
Donde:  $A'$  es la altura libre sobre electrodos (m);  $h$  es la altura de los electrodos (m); y  $hr$  es la altura de trabajo de la columna de flotación (1.10 m).

La definición gráfica de la altura libre sobre electrodos, puede observarse en la Figura 59.

En cada corrida se utilizaron nueve electrodos, pero para cumplir con las características requeridas en la matriz de diseño, se ocuparon un total de cuatro alturas distintas (Tabla 24).

**Tabla 24. Condiciones y componentes resultantes del replanteamiento del diseño de experimentos (elaboración propia).**

Experimento	A: Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	I: Intensidad de corriente (A)	$a_a$ : Área total de ánodos (m <sup>2</sup> )	h: Altura de electrodos (m)	A': Altura libre sobre electrodos (m)
1	24.5	3.62	0.148	0.41	0.63
2	60	3.62	0.060	0.17	0.87
3	24.5	9.05	0.369	1.03	0.01
4	60	9.05	0.151	0.42	0.62
5	24.5	3.62	0.148	0.41	0.63
6	60	3.62	0.060	0.17	0.87
7	24.5	9.05	0.369	1.03	0.01
8	60	9.05	0.151	0.42	0.62
9	42.25	6.34	0.150	0.42	0.62
10	42.25	6.34	0.150	0.42	0.62
11	42.25	6.34	0.150	0.42	0.62
12	42.25	6.34	0.150	0.42	0.62



**Figura 59. Reactor de EF: a) electrodos; b) altura libre sobre electrodos; c) efluente de columna de flotación (elaboración propia).**

## 11 EXPERIMENTOS CON REACTOR RECONFIGURADO

### 11.1 PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE ALUMINIO

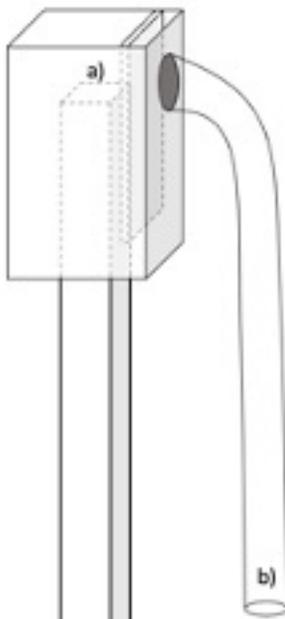
#### 11.1.1 Descripción

Antes de poner en práctica la nueva configuración de reactor, se realizó una prueba de producción de aluminio con agua de pozo libre de microalgas, para cada uno de los 12 experimentos descritos en la Tabla 23 y Tabla 24. Los objetivos de estas pruebas fueron:

- Conocer la capacidad de producción de aluminio de cada uno de los nuevos electrodos.
- Comprobar que los nuevos electrodos demandan un voltaje menor al soportado por la fuente de poder (20 V).
- Comprender la dinámica del aluminio dentro del reactor y de esta manera distinguir qué fracción del coagulante se queda dentro del dispositivo y que parte sale al efluente.

La medición de aluminio se realizó en dos puntos del reactor (ver Figura 60):

- a) En el efluente de la columna de flotación.
- b) En el extremo final de la manguera que drena el agua tratada del reactor.



*Figura 60. Puntos de toma de muestra de aluminio en dispositivo experimental (elaboración propia).*

La secuencia de operación del reactor consistió en:

1. Conexión e introducción de electrodos al reactor.
2. Encendido de bomba peristáltica y ajuste de caudal (2 L/min).
3. Encendido de la fuente de poder.
4. Ajuste de amperaje requerido.
5. Estabilización del reactor durante 20 min (tiempo establecido en las pruebas fisicoquímicas del apartado 9.3.2).
6. Toma de muestra en a) y en b) para medir aluminio.
7. Repetir pasos del 1 al 6 con cada juego de electrodos.

### 11.1.2 Resultados

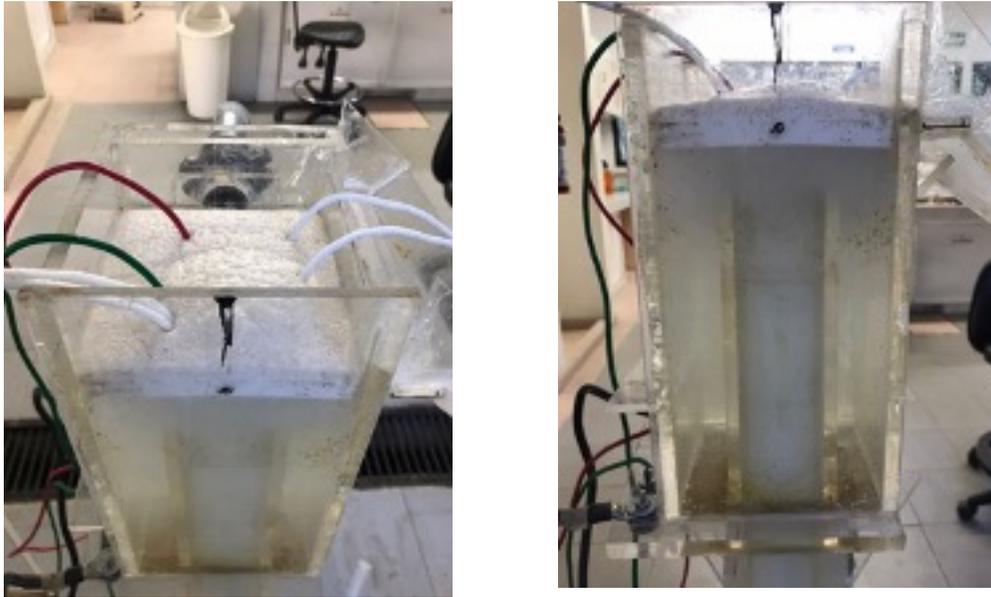
En esta etapa de la experimentación fue posible identificar lo siguiente:

- Tanto en (a) como en (b) la producción de aluminio fue superior a la calculada teóricamente, obteniéndose, al igual que en las pruebas preliminares, una sobreproducción del mismo.
- La concentración de aluminio en (a) fue superior a la medida en (b) (Figura 60). El promedio de la producción de aluminio en (a) fue de 246%, mientras que en (b) fue de 159% (ver Tabla 25).
- Al finalizar los 20 minutos de estabilización en cada prueba, a pH 5.5, en la superficie de la columna de flotación se acumuló una espuma blanca de consistencia viscosa (ver Figura 61); mientras que a pH = 9 se observa una película viscosa de color grisáceo (ver Figura 62).
- Los voltajes demandados con la nueva configuración no comprometen el límite de voltaje de la fuente de poder utilizada (20 V) (ver Tabla 25).
- Al igual que en las pruebas preliminares, parte del aluminio producido reacciona previo al desnatador, señalando una adecuada actividad en la columna del reactor, además, la espuma producida se acumula en la superficie del reactor sin ser arrastradas por el efluente.

En la ECF, el hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) y las burbujas generadas en la hidrólisis, son los protagonistas del proceso. La acumulación del hidróxido de aluminio en la superficie del reactor forma una película viscosa, cuando los hidróxidos de carga positiva (generados con un pH con tendencia al ácido) se adhiere a cualquier partícula con carga negativa, forman flocs. Las burbujas de gas (caracterizadas por tener una carga negativa) (Valeriano, 2018; Mickova, 2015) se adhieren al  $\text{Al}(\text{OH})_3$  formando flocs de baja densidad que flotan en la superficie del líquido (Landels *et al.*, 2019). Este fenómeno es el responsable de la generación de la espuma blanquecina y viscosa observada a pH 5.5.

Tal y como se muestra en la Tabla 25, parte del aluminio generado es retenido dentro del reactor y parte es arrastrado al efluente, lo que dificulta cuantificar dicho coagulante en el sistema propuesto.

El voltaje demandado por los electrodos no compromete el límite de voltaje establecido por la fuente de poder, lo que anticipa un adecuado desempeño eléctrico de los mismos.



*Figura 61. Acumulación de espuma en columna de flotación, experimentos a pH = 5.5.*



*Figura 62. Acumulación de hidrogel a pH = 9.*

**Tabla 25. Resultados en pruebas preliminares de aluminio (elaboración propia).**

Exp	pH	Conductividad (μS/cm)	Altura de electrodos (m)	Dosis de Al (mg/L)	Concentración de Al en (a) (mg/L)	% de producción de Al en (a)	Concentración de Al en (b) (mg/L)	% de producción de Al en (b)	Voltaje demandado (V)
1	5.5	305.9	0.41	10	33.6	336	13.95	140	6.9
2	5.5	305.9	0.17	10	25.7	257	13.45	135	13.6
3	5.5	305.9	1.03	25	46.26	185	29	116	7
4	5.5	305.9	0.42	25	50.9	204	27	108	14
5	9	333.0	0.41	10	24	240	18.95	190	6.7
6	9	333.	0.17	10	21	210	19	190	13.7
7	9	333.0	1.03	25	67.9	272	41.45	166	7.2
8	9	333.0	0.42	25	70	280	45.95	184	14.3
9	7.25	383.4	0.42	17.5	47	269	31	177	11.2
10	7.25	383.4	0.42	17.5	44	251	29.5	169	11.4
11	7.25	383.4	0.42	17.5	40	222	33.3	185	11.6
12	7.25	383.4	0.42	17.5	38.85	222	28	160	11.7

## 11.2 DISEÑOS DE EXPERIMENTOS 2<sup>3</sup>

### 11.2.1 Descripción

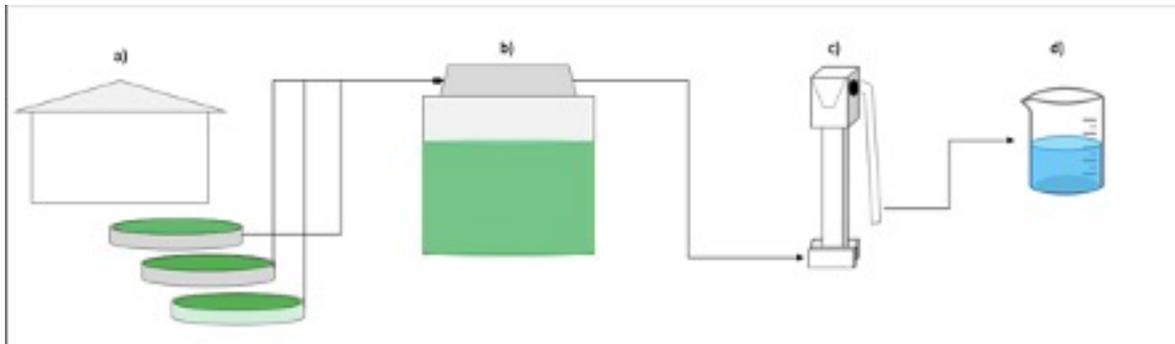
Una vez generada la nueva matriz de experimentos y evaluados sus componentes, se realizaron tres diseños 2<sup>3</sup>, cada uno con concentración diferente de microalgas (medidas como clorofila-a), pero los tres bajo las condiciones descritas en la Tabla 23 y la Tabla 24.

Se realizó el cultivo de microalgas en tres recipientes a cielo abierto (ver Figura 63). Para cada diseño de experimentos, el agua en los tres recipientes fue mezclada y utilizada como agua problema (ver Figura 64). El volumen utilizado para llevar a cabo cada diseño de experimentos fue de 480 L, sin embargo, se decidió cultivar un total de 900 L por diseño, para prevenir cualquier contratiempo que involucre la falta de agua.

Las concentraciones de clorofila-a de estudio fueron de 59, 120 y 139 µg/L (las tres concentraciones son consideradas típicas en un cuerpo de agua eutrófico según el índice de Carlson).



*Figura 63. Cultivo de microalgas utilizadas como agua problema.*



*Figura 64. Proceso de recolecta de microalgas y aplicación de ECF: a) área de cultivos de microalgas; b) recipiente de mezclada de agua de cultivos; c) tratamiento de ECF; d) efluente de agua tratada (elaboración propia).*

Antes de comenzar cualquier diseño, el agua cruda fue caracterizada bajo los siguientes parámetros:

- Color aparente. Como indicador indirecto de la cantidad de microalgas.
- Clorofila-a y feofitina-a. Como indicador directo de la presencia de microalgas y el estado fisiológico de las mismas.
- pH y Conductividad eléctrica. A razón de conocer cómo su comportamiento se ve afectado por un proceso de ECF.
- COT. Como indicador de compuestos orgánicos totales dentro del cultivo.
- DQO. Para conocer la concentración de la materia orgánica químicamente oxidable dentro del cultivo microalgal.

Debido al comportamiento similar entre la turbiedad y el color aparente evidenciado en las pruebas preliminares, en esta fase de experimentación se prescindió de la turbiedad y se eligió el color aparente como única respuesta principal al proceso de EFC en las tres etapas del tratamiento: ER (Efluente de Reactor), ERS (Efluente de Reactor Sedimentado) y ERF (Efluente de Reactor Floculado con polímero y sedimentado), tal y como se describe en la sección 9.4.1.

Al terminar los ensayos del diseño experimental para cada concentración de microalgas, los resultados fueron analizados estadísticamente en una hoja de cálculo de software Excel de la paquetería Microsoft Office 365, con propósito de detectar:

- Los factores con mayor efecto significativo sobre la respuesta principal, esto en las tres etapas del proceso.
- Los niveles de operación de cada variable de estudio con mayor efecto sobre la respuesta.
- Las interacciones entre los factores con efectos significativos sobre el color aparente.
- El efecto de la concentración de clorofila-a en el proceso de ECF.
- La corrida con mayor remoción de color (mejor experimento) y las condiciones de operación del mismo.

A los mejores experimentos se les midió clorofila-a, feofitina-a, COT y DQO en sólo dos etapas del proceso:

- Efluente del reactor (ER). Con el propósito de conocer la capacidad neta del dispositivo experimental en la remoción de microalgas.
- Efluente de reactor floculado con polímero y sedimentado (ERF). Con motivo de conocer si la capacidad de remoción de microalgas aumenta significativamente con la adición de un polímero y, a su vez, evaluar si esto es viable técnica y económicamente. De ser así, dicha etapa sería integrada al reactor propuesto.

## 11.2.2 Resultados de las corridas experimentales

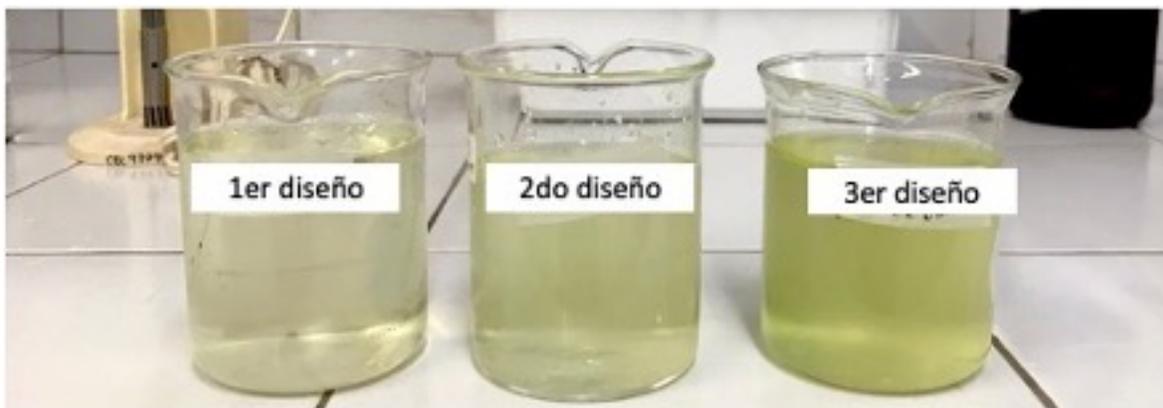
### 11.2.2.1 Eficiencias de remoción

Cada diseño de experimentos fue identificado por las distintas concentraciones de clorofila-a que estas presentaron en el agua cruda (ver Figura 65). Las condiciones iniciales se muestran en la Tabla 26.

*Tabla 26. Condiciones iniciales de los diseños de experimentos (elaboración propia).*

Diseño de experimentos	Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ )	Feofitina ( $\mu\text{g/L}$ )	Color (U Pt-Co)	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	COT (mg/L)	DQO (mg/L)
1°	59	50.8	202	303.1	9.1	29.9
2°	120	43.4	452	302.1	13.1	57.6
3°	139	22.8	844	268.2	18.7	77.2

El pH inicial para el 1°, 2° y 3° diseño, fue básico con valores de 8.71, 9.01 y 9.1 respectivamente; es importante destacar que el pH inicial de cada uno de los diseños de experimentos fue ajustado previo a cada corrida experimental de acuerdo a lo expresado en la Tabla 23, para ello se utilizó ácido sulfúrico al 97%. A menor valor de pH requerido, mayor necesidad de ácido.



*Figura 65. Muestras de agua cruda de los tres diseños de experimentos.*

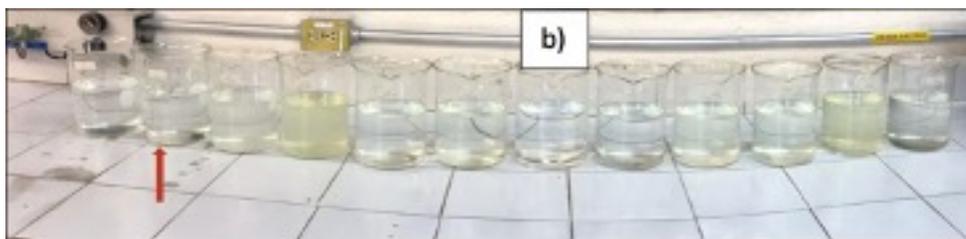
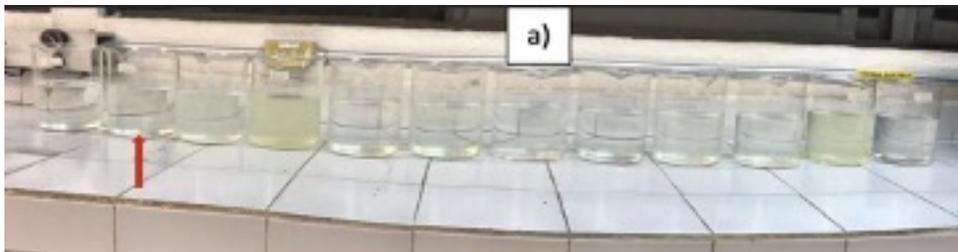
Las condiciones de operación y los resultados obtenidos en los tres diseños de experimentos se muestran de la Tabla 27 a la Tabla 29, en donde se puede observar que:

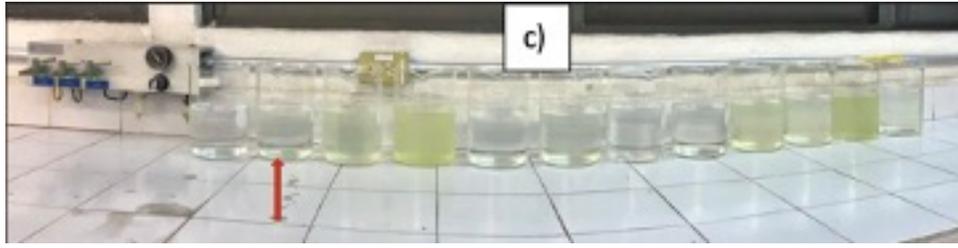
- En el efluente del reactor (ER), la corrida número 2 fue la más eficiente para la remoción de color en los tres diseños de experimentos (ver Figura 66 y Tabla 30).
- En el efluente de reactor sedimentado (ERS), la corrida 2 obtuvo mayor remoción de color en los tres diseños de experimentos, sin embargo, la corrida 4 empató su eficiencia en el tercer diseño experimental (ver Tabla 30)
- En el efluente de reactor floculado con polímero y sedimentado (ERF), la corrida 2 fue más eficiente en cuanto a la remoción de color, no obstante, este desempeño fue empatado por la corrida 3 y 4 del tercer diseño de experimentos (ver Tabla 30).
- La mayor eficiencia de remoción de color se obtuvo en el tercer diseño de experimentos, donde la clorofila-a fue de 139  $\mu\text{g/L}$ , sin embargo, el color final fue muy parecido al del primer diseño, donde la clorofila-a fue la más baja.

La Figura 66 y la Tabla 30 muestran los mejores resultados obtenidos en cada uno de los diseños experimentales, con respecto a la remoción de color.

En cuanto a la remoción de los otros parámetros evaluados, comparando la mejor corrida de los tres diseños de experimentos, tanto en ER, como en ERF, los mayores niveles de remoción de clorofila-a, feofitina-a, COT y DQO, fueron obtenidos en tercer diseño, es decir, en donde la clorofila-a inicial fue la más elevada (ver Figura 67 y Tabla 31).

Es importante señalar que las mejores eficiencias se obtuvieron en el efluente del reactor floculado (ERF), lo que indica que el efluente del reactor requiere una etapa adicional para lograr la remoción total de las microalgas.





**Figura 66. Corrida con mayor remoción de color (corrida número 2). a) Primera prueba experimental (Cl-a: 59  $\mu\text{g/L}$ ); b) Segunda prueba experimental (Cl-a: 120  $\mu\text{g/L}$ ); c) Tercera prueba experimental (Cl-a: 139  $\mu\text{g/L}$ ).**

**Tabla 27. Resultados del primer diseño de experimentos: Cl-a= 59 µg/L; Color aparente inicial: 202 U Pt-Co (elaboración propia).**

Exp.	Condiciones de operación					Color aparente					
						ER		ERS		ERF	
	A (A/m <sup>2</sup> )	B (mg/L)	C	h (cm)	A' (cm)	U Pt-Co	% de remoción	U Pt-Co	% de Remoción	U Pt-Co	% de remoción
1	24.5	10	5.5	41	63	74	63	55	73	8	96
2	60	10	5.5	17	87	48	76	44	78	7	97
3	24.5	25	5.5	103	1	123	39	69	66	16	92
4	60	25	5.5	42	62	113	44	44	78	16	92
5	24.5	10	9	41	63	123	39	145	28	94	53
6	60	10	9	17	87	152	25	134	34	86	57
7	24.5	25	9	103	1	99	51	67	67	23	89
8	60	25	9	42	62	84	58	66	67	17	92
9	42.25	18	7.25	42	62	88	56	86	57	20	90
10	42.25	18	7.25	42	62	101	50	90	55	22	89
11	42.25	18	7.25	42	62	92	54	87	57	26	87
12	42.25	18	7.25	42	62	102	50	99	51	23	89

A: densidad de corriente; B: dosis de aluminio; C: pH; h: altura de electrodos; A': altura libre sobre electrodos.

**Tabla 28. Resultados del segundo diseño de experimentos:  $Cl-a= 120 \mu g/L$ ; Color aparente inicial: 452 U Pt-Co (elaboración propia).**

Exp.	Condiciones de operación					Color aparente					
						ER		ERS		ERF	
	<b>A</b> (A/m <sup>2</sup> )	<b>B</b> (mg/L)	<b>C</b>	<b>h</b> (cm)	<b>A'</b> (cm)	U Pt-Co	% de remoción	U Pt-Co	% de remoción	U Pt-Co	% de remoción
1	24.5	10	5.5	41	63	106	77	48	89	16	96
2	60	10	5.5	17	87	69	85	37	92	13	97
3	24.5	25	5.5	103	1	172	62	57	87	13	97
4	60	25	5.5	42	62	108	76	40	91	35	92
5	24.5	10	9	41	63	269	40	284	37	194	57
6	60	10	9	17	87	232	49	230	49	174	62
7	24.5	25	9	103	1	215	52	203	55	73	84
8	60	25	9	42	62	197	56	147	67	77	83
9	42.25	18	7.25	42	62	159	65	105	77	33	93
10	42.25	18	7.25	42	62	166	63	114	75	37	92
11	42.25	18	7.25	42	62	145	68	97	79	30	93
12	42.25	18	7.25	42	62	159	65	115	75	39	91

A: densidad de corriente; B: dosis de aluminio; C: pH; h: altura de electrodos; A': altura libre sobre electrodos.

**Tabla 29. Resultados del tercer diseño de experimentos: Cl-a= 139 µg/L; Color aparente inicial: 844 U Pt-Co (elaboración propia).**

Exp.	Condiciones de operación					Color aparente					
						ER		ERS		ERF	
	A (A/m <sup>2</sup> )	B (mg/L)	C	h (cm)	A' (cm)	U Pt-Co	% de remoción	U Pt-Co	% de remoción	U Pt-Co	% de remoción
1	24.5	10	5.5	41	63	106	87	90	89	11	99
2	60	10	5.5	17	87	72	91	50	94	8	99
3	24.5	25	5.5	103	1	163	81	51	94	8	99
4	60	25	5.5	42	62	86	90	50	94	8	99
5	24.5	10	9	41	63	347	79	337	60	265	69
6	60	10	9	17	87	314	63	308	64	281	67
7	24.5	25	9	103	1	213	75	169	80	108	87
8	60	25	9	42	62	218	74	172	80	112	87
9	42.25	18	7.25	42	62	164	81	143	83	37	96
10	42.25	18	7.25	42	62	169	80	161	81	42	95
11	42.25	18	7.25	42	62	188	78	181	79	38	95
12	42.25	18	7.25	42	62	176	79	172	80	49	94

A: densidad de corriente; B: dosis de aluminio; C: pH; h: altura de electrodos; A': altura libre sobre electrodos.

**Tabla 30. Experimentos con mejores resultados para la remoción de color (elaboración propia).**

Etapa del proceso	1er diseño de experimentos						2do diseño de experimentos						3er diseño de experimentos					
	Experimento	Condiciones de operación					Experimento	Condiciones de operación					Experimento	Condiciones de operación				
		A	B	C	h	A'		A	B	C	h	A'		A	B	C	h	A'
ER	2	60	10	5.5	17	87	2	60	10	5.5	17	87	2	60	10	5.5	17	87
ERS	2	60	10	5.5	17	87	2	60	10	5.5	17	87	2	60	10	5.5	17	87
	4	60	25	5.5	42	62							3	24.5	25	5.5	103	1
													4	60	25	5.5	42	42
ERF	2	60	10	5.5	17	87	2	60	10	5.5	17	87	2	60	10	5.5	17	87
							3	24.5	25	5.5	103	1	3	24.5	25	5.5	103	1
													4	60	25	5.5	42	62

A: densidad de corriente; B: dosis de aluminio; C: pH; h: altura de electrodos; A': altura libre sobre electrodos.

**Tabla 31. Resultados de la corrida más eficiente (número 2), en los diferentes diseños de experimentos (elaboración propia).**

Parámetro	1er diseño		2do diseño		3er diseño	
	Valor	% de remoción	Valor	% de remoción	Valor	% de remoción
Efluente de reactor (ER)						
Color aparente (U Pt-Co)	48	76	69	85	72	91
Clorofila (µg/L)	14.3	76	21.4	82	23.4	83
Feofitina (µg/L)	14.2	72	13.5	69	5.9	74
COT (mg/L)	1.8	80	2.5	81	3.3	82
DQO (mg/L)	6.5	78	11.04	81	13.25	83
Efluente de reactor sedimentado (ERS)						
Color aparente (U Pt-Co)	44	78	37	92	50	94
Efluente de reactor floculado (ERF)						
Color aparente (U Pt-Co)	7	97	13	97	8	99
Clorofila (µg/L)	1.3	98	2.3	98	0.7	99
Feofitina (µg/L)	1	98	0.8	98	0.3	99
COT (mg/L)	1.1	88	0.7	95	0.7	96
DQO (mg/L)	4.45	85	1.26	98	1.9	98

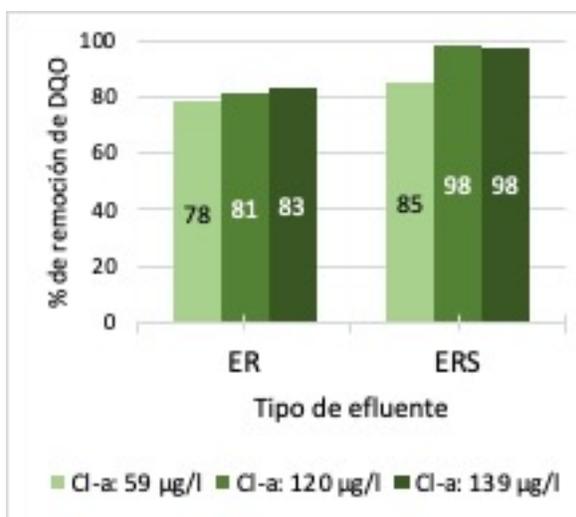
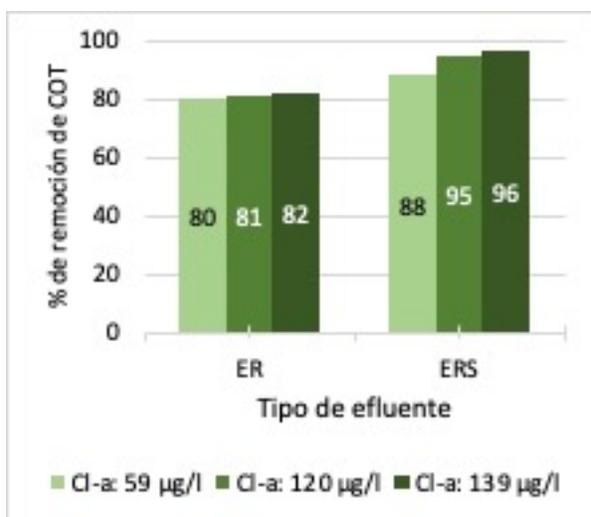
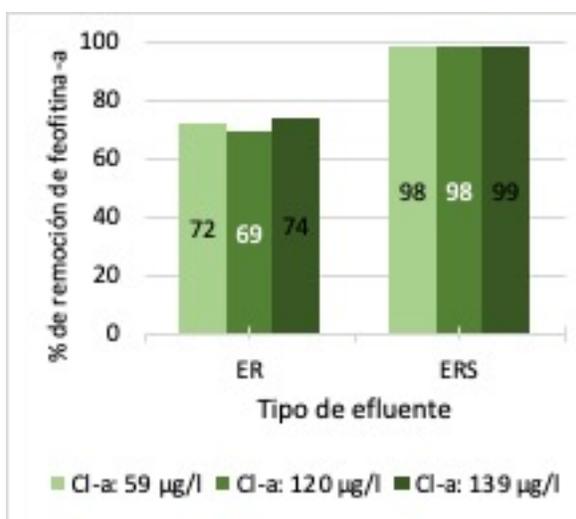
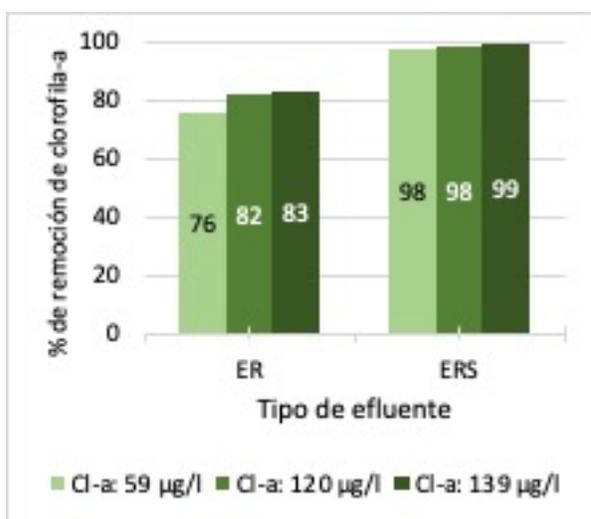
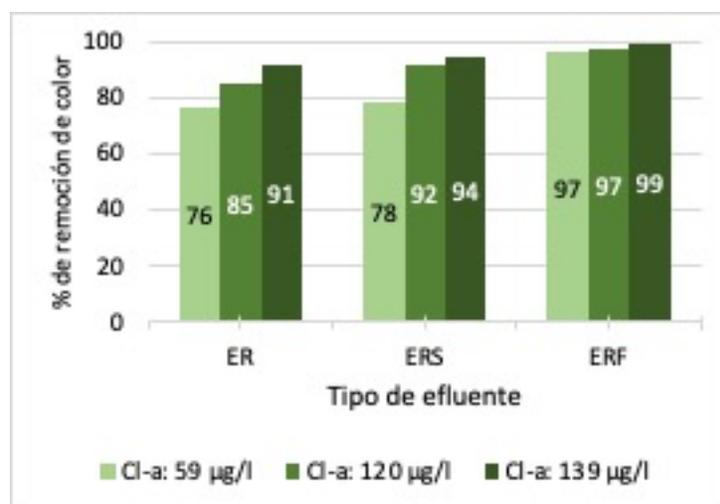


Figura 67. Porcentajes de remoción de la corrida más eficiente en los tres diseños de experimentos (elaboración propia).

### 11.2.2.2 Comportamiento del pH y la conductividad

En cuanto al pH y la conductividad, fue posible notar que:

- La conductividad final en cada corrida está estrechamente relacionada con el ajuste de pH inicial, debido a los iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) agregados. A menor pH, mayor conductividad (ver Figura 68).
- En los tres diseños de experimentos, cuando el pH es bajo (5.5), este tiende al neutro, y cuando las pruebas comienzan en un pH alto (9), su valor no disminuye; esto es consecuencia del efecto neutralizador de los iones  $\text{OH}^-$  generados en el cátodo (ver Figura 69).

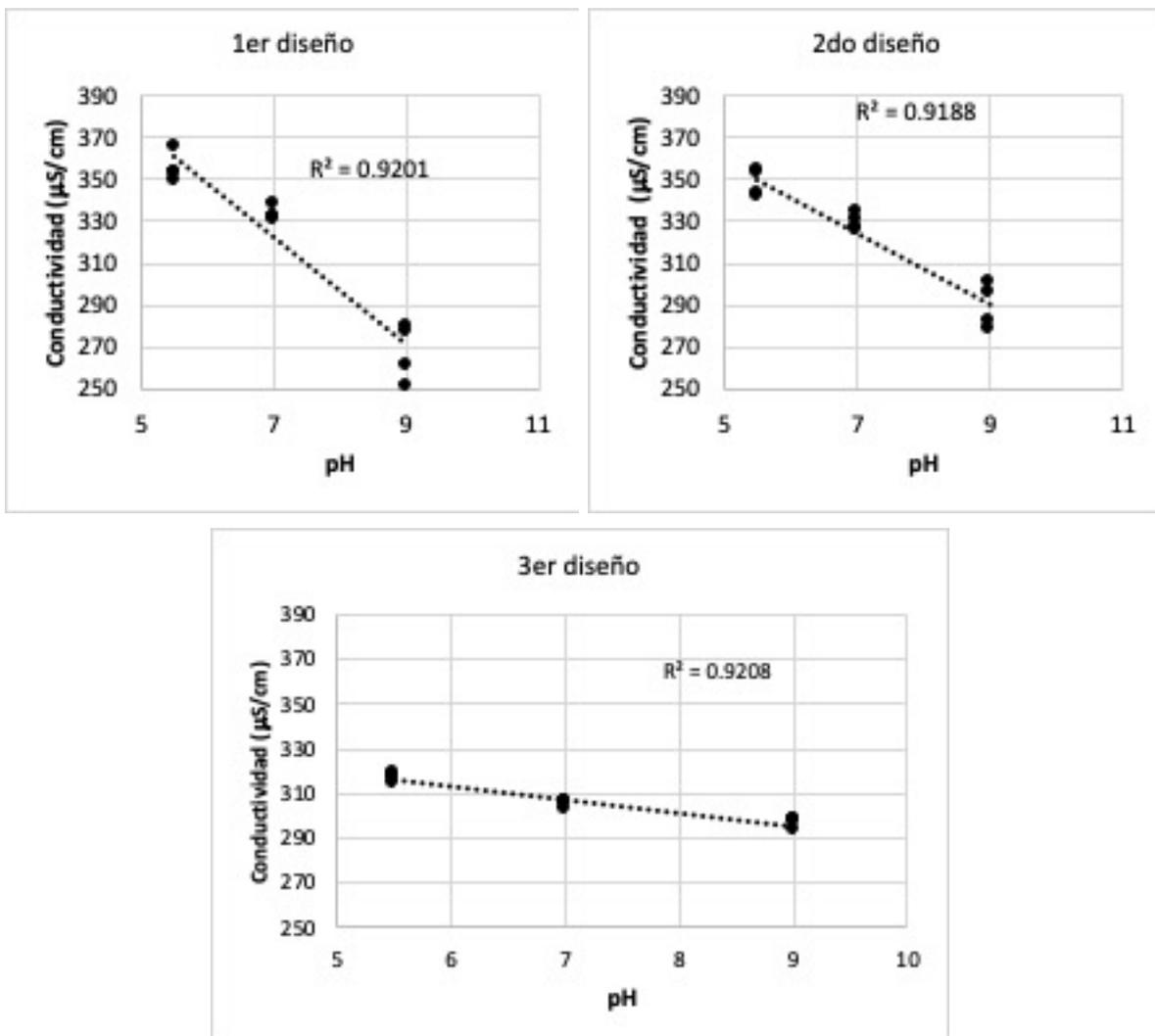


Figura 68. Relación entre el pH inicial del agua en cada prueba y la conductividad final de esta (elaboración propia).

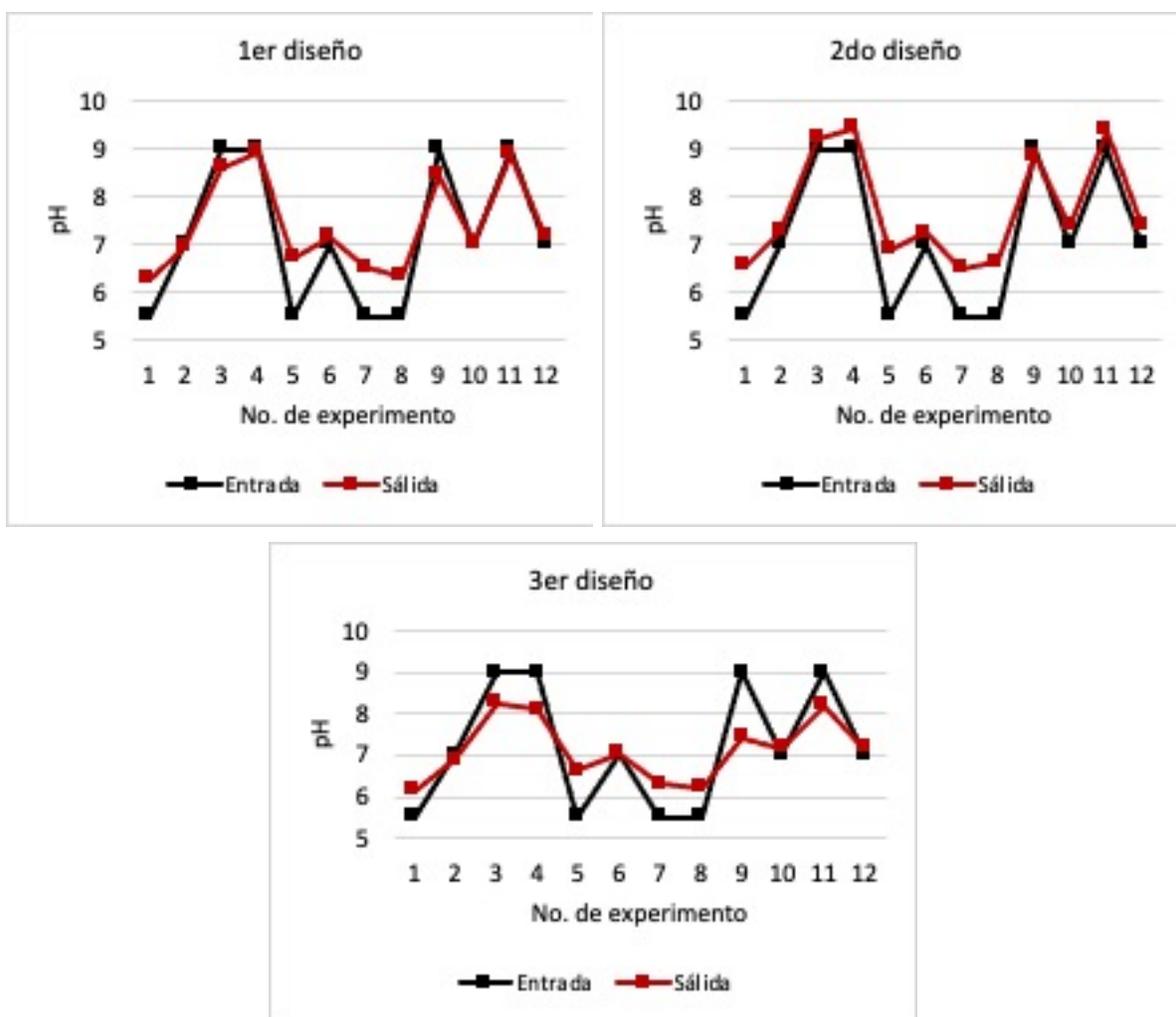


Figura 69. Respuesta del pH después de un proceso de ECF (elaboración propia).

### 11.2.2.3 Comportamiento del voltaje aplicado

Al analizar el voltaje, fue posible observar que:

- En cada una de las pruebas el voltaje comenzó a estabilizarse 10 segundos después de iniciar el experimento.
- Una vez estabilizado, el voltaje no aumentó, lo que descarta la posibilidad de pasivación en los electrodos.
- El voltaje requerido por los nuevos electrodos no comprometió el límite máximo de la fuente de poder en ninguna prueba (ver Tabla 32).

**Tabla 32. Voltajes demandados en los tres diseños de experimentos (elaboración propia).**

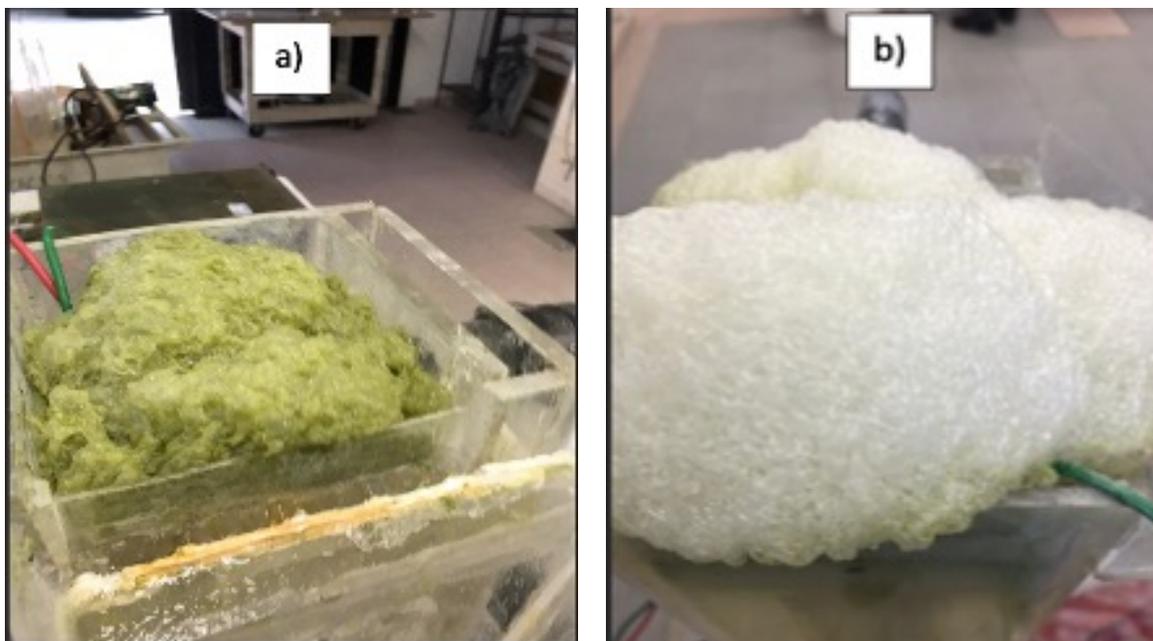
No. De experimento	pH entrada	pH salida	1er diseño		2do diseño			3er diseño	
			$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Voltaje demandado (V)	pH salida	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Voltaje demandado	pH salida	Voltaje demandado (V)
1	5.5	6.3	353	5.7	6.6	353	7.6	6.2	6.3
2	7.25	6.5	365	11.4	6.5	354	12	6.3	12.3
3	9	6.7	353	5.9	6.9	343	6.9	6.6	6.9
4	9	6.3	349	11.7	6.6	342	13.1	6.1	13.3
5	5.5	8.9	280	7.6	9.4	295	7.6	8.1	6.2
6	7.25	8.9	277	14.3	9.4	301	13.9	8.2	12.3
7	5.5	8.6	251	7.6	9.2	278	7.9	8.3	6.5
8	5.5	8.4	261	14.4	8.8	282	14	7.4	13
9	9	6.9	331	9.7	7.3	326	10.3	6.9	10.5
10	7.25	7.0	330	9.1	7.4	330	9.7	7.2	9.9
11	9	7.2	338	9.3	7.2	327	9.9	7.0	10.2
12	7.25	7.2	332	9.3	7.4	334	9.6	7.2	9.8

#### 11.2.2.4 Comportamiento de los flocs formados

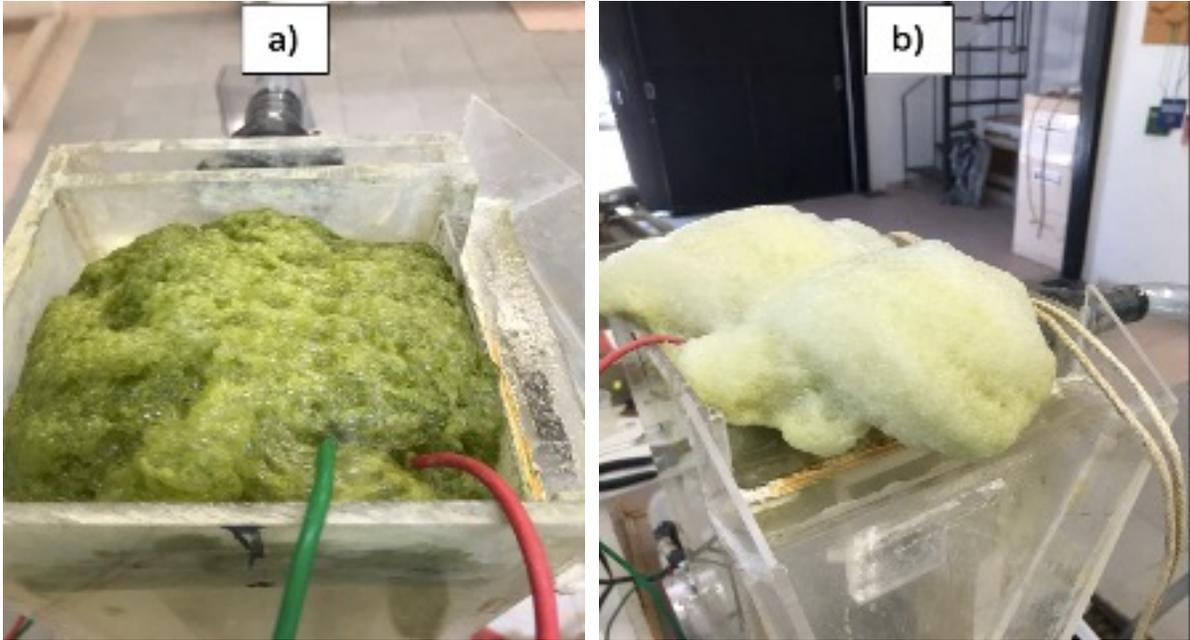
El coagulante formado durante la oxidación de los electrodos de aluminio (ver Ecuación 1), entra en contacto con los hidróxidos liberados en la reacción de reducción en el cátodo (Ecuación 2), lo cual provoca la formación de especies químicas capaces de desestabilizar las microalgas en el medio, y posteriormente estas son llevadas a la superficie por el arrastre del líquido y de las burbujas generadas por la reacción de hidrólisis en el agua (ver Ecuación 5), generando espuma en la superficie del líquido.

Durante el proceso de EFC, las microalgas removidas se acumularon en la superficie del agua en el reactor en forma de una espuma viscosa de una tonalidad verde; al comparar los experimentos con menor capacidad de remoción de color (experimentos a pH 9) vs los más eficientes (pruebas a pH 5.5), se observó una diferencia en la tonalidad de dicha espuma; por ejemplo, en el primer diseño de experimentos, la corrida 6 presenta una espuma viscosa y blanca, mientras que en la corrida 2, la espuma es viscosa pero de una tonalidad verde (ver Figura 70). El tono blancuzco, indica poca eficiencia en la desestabilización de las microalgas y por ende, un pobre depósito de las mismas en la superficie del reactor (Landels et al., 2019).

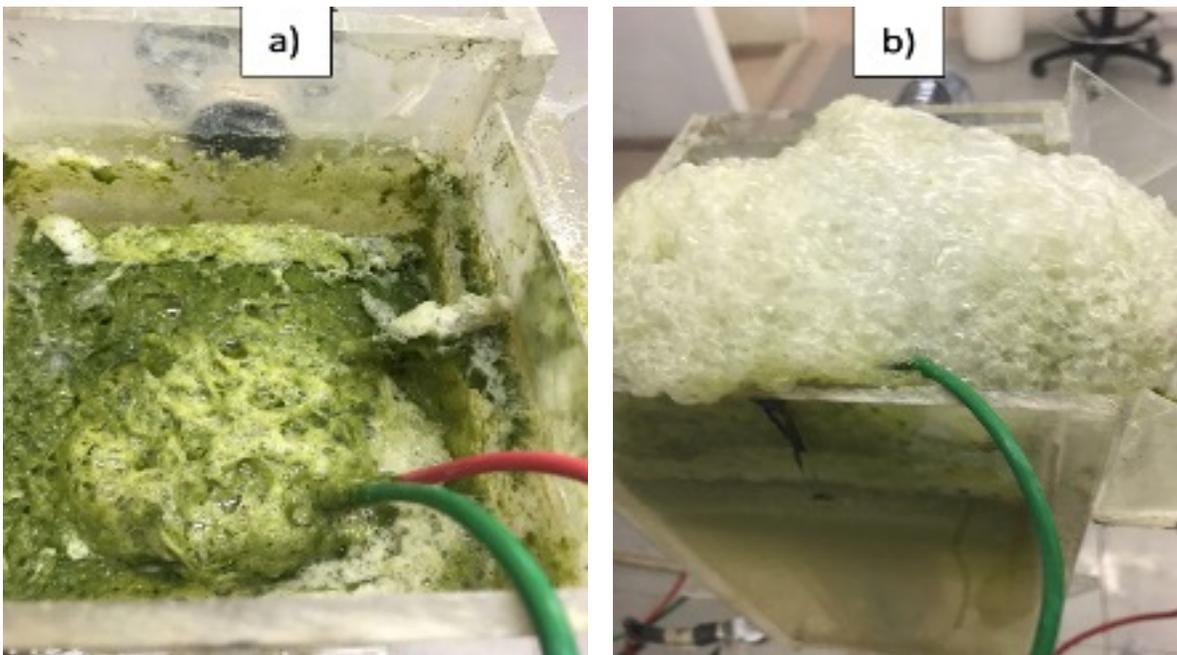
Los resultados muestran que es posible generar flocs con tendencia a flotar, indicando una adecuada desestabilización de los mismos.



*Figura 70. Primer diseño de experimentos. a) corrida 2; b) corrida 6.*



*Figura 71. Segundo diseño de experimentos. a) corrida 2; b) corrida 5.*



*Figura 72. Tercer diseño de experimentos. a) corrida 2; b) corrida 5.*

### 11.2.3 Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico de los resultados obtenidos en los tres diseños de experimentos, se incluyó la concentración de clorofila-a como una cuarta variable (factor D), con intención de conocer su efecto sobre el color aparente e interacción con las demás variables de estudio.

Además, se realizó un segundo análisis, en donde se sustituyó el factor *densidad de corriente* por la *altura libre sobre electrodos*, con el propósito de saber si existe un efecto individual sobre la respuesta (no fue posible integrar ambos factores al mismo diseño de experimentos debido a que no son independientes entre sí).

Es importante resaltar que estas modificaciones en el diseño de experimentos se realizaron con el único objetivo de enriquecer el análisis estadístico e identificar de qué manera interaccionan estas nuevas variables con las establecidas en la Tabla 24, evaluando su efecto sobre la respuesta.

El análisis se realizó englobando los tres diseños experimentales, divididos en las tres etapas del proceso (ER, ERS y ERF). Este cambio transformó el diseño, de un  $2^3$  a un  $3 \times 2^3$ .

Para este análisis, cada factor se identificó como:

- Factor A: Densidad de corriente
- Factor A': Altura libre sobre electrodos.
- Factor B: Dosis de aluminio.
- Factor C: *pH*.
- Factor D: Concentración de clorofila-a.
- Respuesta Y: Color aparente.

La transformación del diseño de experimentos para su análisis estadístico puede observarse en la Tabla 33 y la Tabla 34.

En esta etapa se consiguió jerarquizar los factores con efecto significativo, en una escala de mayor a menor relevancia estadística (incluyendo las interacciones entre ellos), tal y como se muestran en los gráficos de Pareto (ver de Figura 73 a Figura 75); también fue posible identificar bajo qué términos se obtiene el menor color en el efluente (ver Tabla 35).

**Tabla 33. Diseño de experimentos 3x2<sup>3</sup>. Densidad de corriente como factor A (elaboración propia).**

No. Exp.	Variables codificadas				Variables sin codificar				Respuesta		
	A	B	C	D	A (A/m <sup>2</sup> )	B (mg/L)	C	D (μg/L)	Y (U Pt-Co)		
									ER	ERS	ERF
1er diseño de experimentos; color aparente inicial: 202 U Pt-Co											
1	-1	-1	-1	-1	24.5	10	5.5	59	74	55	8
2	1	-1	-1	-1	60	10	5.5	59	48	44	7
3	-1	1	-1	-1	24.5	25	5.5	59	123	69	16
4	1	1	-1	-1	60	25	5.5	59	113	44	16
5	-1	-1	1	-1	24.5	10	9	59	123	145	94
6	1	-1	1	-1	60	10	9	59	152	134	86
7	-1	1	1	-1	24.5	25	9	59	99	67	23
8	1	1	1	-1	60	25	9	59	84	66	17
9	0	0	0	-1	42.25	18	7.3	59	88	86	20
10	0	0	0	-1	42.25	18	7.3	59	101	90	22
11	0	0	0	-1	42.25	18	7.3	59	92	87	26
12	0	0	0	-1	42.25	18	7.3	59	102	99	23
2do diseño de experimentos; color aparente inicial: 452 U Pt-Co											
13	-1	-1	-1	0.53	24.5	10	5.5	120	106	48	16
14	1	-1	-1	0.53	60	10	5.5	120	69	37	13
15	-1	1	-1	0.53	24.5	25	5.5	120	172	57	13
16	1	1	-1	0.53	60	25	5.5	120	108	40	35
17	-1	-1	1	0.53	24.5	10	9	120	269	284	194
18	1	-1	1	0.53	60	10	9	120	232	230	174
19	-1	1	1	0.53	24.5	25	9	120	215	203	73
20	1	1	1	0.53	60	25	9	120	197	147	77
21	0	0	0	0.53	42.25	18	7.3	120	159	105	33
22	0	0	0	0.53	42.25	18	7.3	120	166	114	37
23	0	0	0	0.53	42.25	18	7.3	120	145	97	30
24	0	0	0	0.53	42.25	18	7.3	120	159	115	39
3er diseño de experimentos; color aparente inicial: 844 U Pt-Co											
25	-1	-1	-1	1	24.5	10	5.5	139	106	90	11
26	1	-1	-1	1	60	10	5.5	139	72	50	8
27	-1	1	-1	1	24.5	25	5.5	139	163	51	8
28	1	1	-1	1	60	25	5.5	139	86	50	8
29	-1	-1	1	1	24.5	10	9	139	347	337	265
30	1	-1	1	1	60	10	9	139	314	308	281
31	-1	1	1	1	24.5	25	9	139	213	169	108
32	1	1	1	1	60	25	9	139	218	172	112
33	0	0	0	1	42.25	18	7.3	139	164	143	37
34	0	0	0	1	42.25	18	7.3	139	169	161	42
35	0	0	0	1	42.25	18	7.3	139	188	181	38
36	0	0	0	1	42.25	18	7.3	139	176	172	49

**Tabla 34. Diseño de experimentos. Altura libre sobre electrodos como factor A' (elaboración propia).**

No. Exp.	Variables codificadas				Variables sin codificar				Respuestas		
	A'	B	C	D	A' (m)	B (mg/L)	C	D (µg/L)	Y (U Pt-Co)		
									ER	ERS	ERF
1er diseño de experimentos; color aparente inicial: 202 U Pt-Co											
1	0.44	-1	-1	-1	0.63	10	5.5	59	74	55	8
2	1.00	-1	-1	-1	0.87	10	5.5	59	48	44	7
3	-1.00	1	-1	-1	0.01	25	5.5	59	123	69	16
4	0.42	1	-1	-1	0.62	25	5.5	59	113	44	16
5	0.44	-1	1	-1	0.63	10	9	59	123	145	94
6	1.00	-1	1	-1	0.87	10	9	59	152	134	86
7	-1.00	1	1	-1	0.01	25	9	59	99	67	23
8	0.42	1	1	-1	0.62	25	9	59	84	66	17
9	0.42	0	0	-1	0.62	18	7.3	59	88	86	20
10	0.42	0	0	-1	0.62	18	7.3	59	101	90	22
11	0.42	0	0	-1	0.62	18	7.3	59	92	87	26
12	0.42	0	0	-1	0.62	18	7.3	59	102	99	23
2do diseño de experimentos; color aparente inicial: 452 U Pt-Co											
13	0.44	-1	-1	0.53	0.63	10	5.5	120	106	48	16
14	1.00	-1	-1	0.53	0.87	10	5.5	120	69	37	13
15	-1.00	1	-1	0.53	0.01	25	5.5	120	172	57	13
16	0.42	1	-1	0.53	0.62	25	5.5	120	108	40	35
17	0.44	-1	1	0.53	0.63	10	9	120	269	284	194
18	1.00	-1	1	0.53	0.87	10	9	120	232	230	174
19	-1.00	1	1	0.53	0.01	25	9	120	215	203	73
20	0.42	1	1	0.53	0.62	25	9	120	197	147	77
21	0.42	0	0	0.53	0.62	18	7.3	120	159	105	33
22	0.42	0	0	0.53	0.62	18	7.3	120	166	114	37
23	0.42	0	0	0.53	0.62	18	7.3	120	145	97	30
24	0.42	0	0	0.53	0.62	18	7.3	120	159	115	39
3er diseño de experimentos; color aparente inicial: 844 U Pt-Co											
25	0.44	-1	-1	1	0.63	10	5.5	139	106	90	11
26	1.00	-1	-1	1	0.87	10	5.5	139	72	50	8
27	-1.00	1	-1	1	0.01	25	5.5	139	163	51	8
28	0.42	1	-1	1	0.62	25	5.5	139	86	50	8
29	0.44	-1	1	1	0.63	10	9	139	347	337	265
30	1.00	-1	1	1	0.87	10	9	139	314	308	281
31	-1.00	1	1	1	0.01	25	9	139	213	169	108
32	0.42	1	1	1	0.62	25	9	139	218	172	112
33	0.42	0	0	1	0.62	18	7.3	139	164	143	37
34	0.42	0	0	1	0.62	18	7.3	139	169	161	42
35	0.42	0	0	1	0.62	18	7.3	139	188	181	38
36	0.42	0	0	1	0.62	18	7.3	139	176	172	49

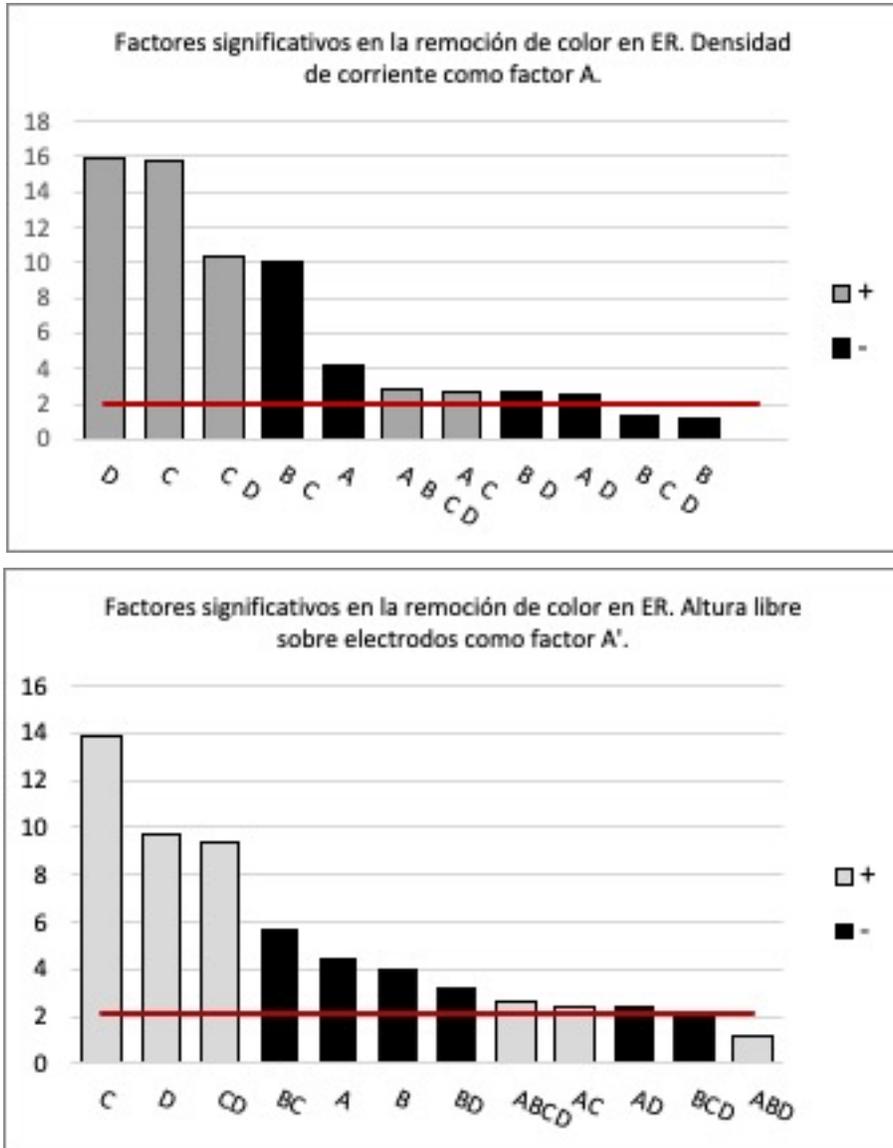


Figura 73. Gráficos de Pareto del análisis estadístico del diseño de experimentos. Factores significativos en la remoción de color aparente medido en ER (elaboración propia).

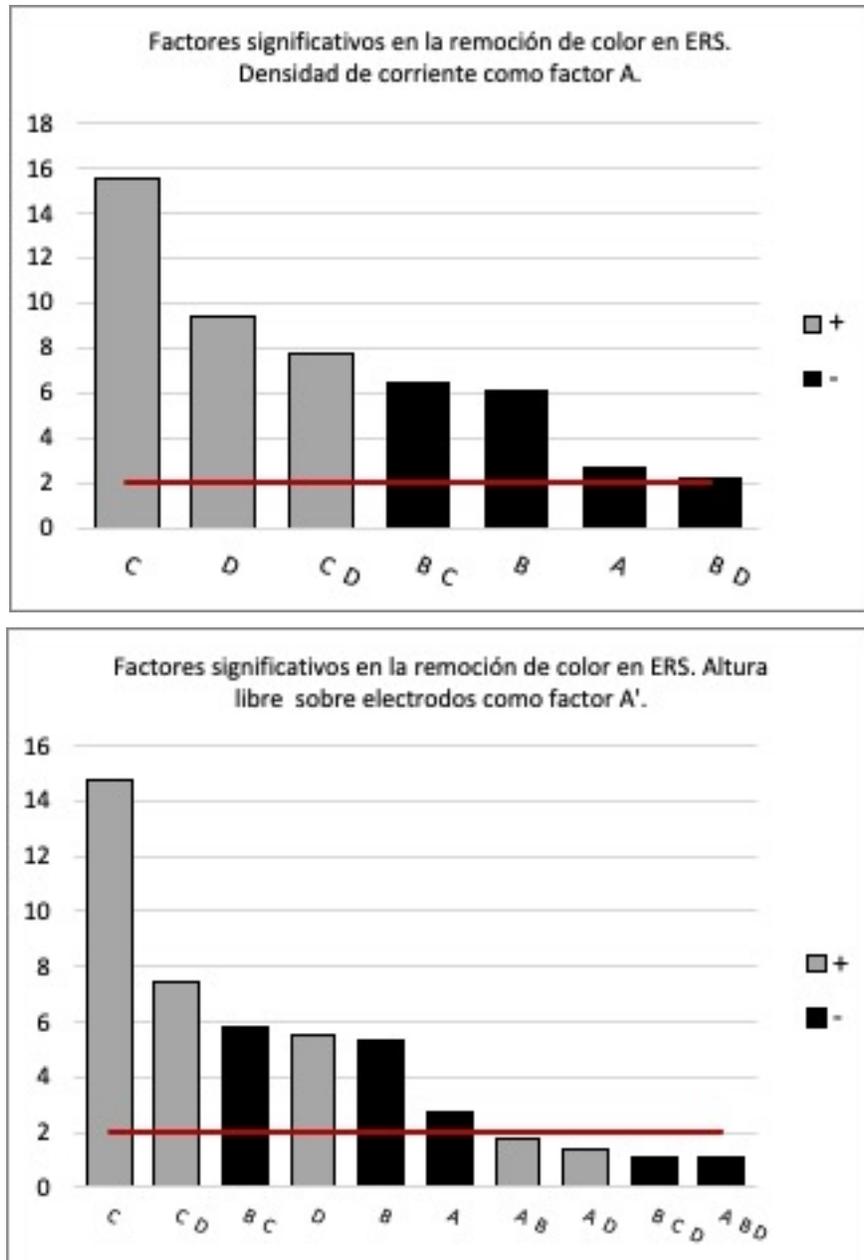


Figura 74. Gráficos de Pareto del análisis estadístico del diseño de experimentos. Factores significativos en la remoción de color aparente medido en ERS (elaboración propia).

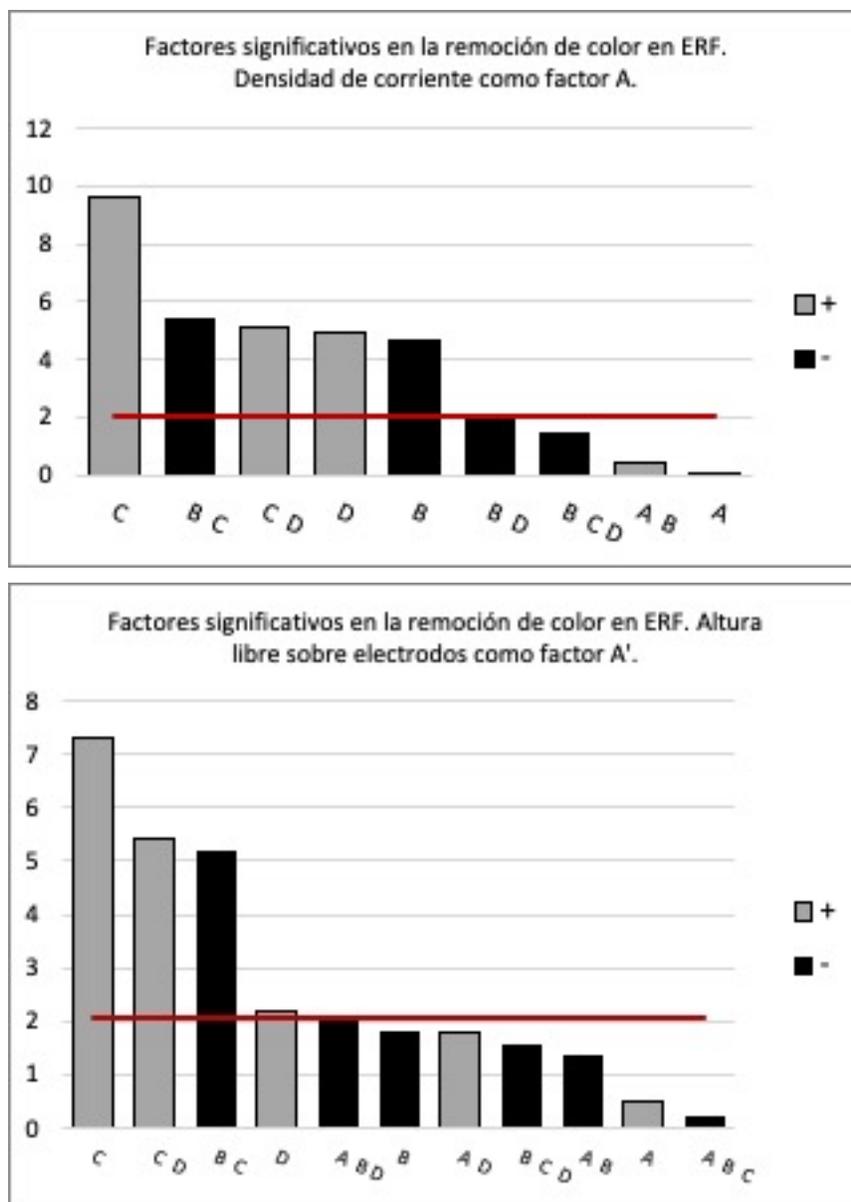


Figura 75. Gráficos de Pareto del análisis estadístico del diseño de experimentos. Factores significativos en la remoción de color aparente medido en ERF (elaboración propia).

**Tabla 35. Análisis del efecto de los factores de diseño sobre la remoción de color (elaboración propia).**

Efecto	Etapa		
	Efluente de reactor (ER)	Efluente de reactor sedimentado (ERS)	Efluente de reactor floculado y sedimentado (ERF)
Factores individuales e interacciones con mayor significancia estadística			
El pH es el factor de mayor significancia en la remoción de color.	x	x	x
La dosis de coagulante es un factor significativo en la remoción de color.		x	x
La interacción entre dosis de coagulante y el pH es un factor significativo en la remoción de color.	x	x	x
La interacción entre el pH y la concentración de clorofila es un factor significativo en la remoción de color.	x	x	x
La interacción entre la densidad de corriente, la dosis de coagulante, el pH y la concentración de clorofila, es un factor significativo en la remoción de color.	x		
La densidad de corriente y la altura sobre electrodos son factores significativos en la remoción de color.	x		
La interacción entre la densidad de corriente y el pH, es un factor significativo en la remoción de color.	x		
La interacción entre la densidad de corriente y la concentración de clorofila, es un factor significativo en la remoción de color.	x		
La interacción entre la dosis de coagulante y la concentración de clorofila-a, es un factor significativo en la remoción de color.	x	x	
Condiciones de operación de factores significativos			
A mayor densidad de corriente, mayor remoción de color.	x	x	x
A mayor altura sobre electrodos, mayor remoción de color.	x	x	x
A menor dosis de coagulante, mayor remoción de color.	x	x	x
A menor pH mayor remoción de color.	x	x	x
A mayor concentración de clorofila-a, mayor remoción de color.	x	x	

De acuerdo a los resultados presentados, la significancia de los factores sigue cierta jerarquía de acuerdo a la etapa en la que se evalúen:

- En una etapa de ER: 1. pH; 2. concentración de clorofila-a; 3. altura libre sobre electrodos, 4. densidad de corriente y 5. Dosis de coagulante.
- En una etapa de ERS: 1. pH; 2. Concentración de clorofila-a; 3. concentración de coagulante; 4. Altura libre sobre electrodos y 5. Densidad de corriente.
- En una etapa de ERF: 1. pH; 2. Concentración de clorofila-a y 3. Dosis de coagulante.

A continuación, se explica la significancia de cada factor participante.

#### **11.2.3.1 pH.**

Como ya varios autores lo han mencionado (Visigalli *et al.*, 2021; Parmentier *et al.*, 2020; Wiley *et al.*, 2016; Golzary *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2010), el pH es uno de los principales protagonistas en un proceso de ECF para la eficiente remoción de microalgas. Para conocer como este factor trascendió en este trabajo de investigación, es importante tomar en cuenta lo siguiente:

1. Las microalgas tienen carga negativa, esto debido a la disociación de diferentes grupos funcionales en su superficie, como los carboxílicos (-COOH) y amino (-NH<sub>2</sub>); estas cargas negativas son las responsables de mantener dichos microorganismos en suspensión (Visigalli *et al.*, 2021; Valeriano *et al.*, 2018).
2. Las especies de aluminio dependen del pH en el medio. Al ser liberado el coagulante del ánodo de sacrificio y entrar en contacto con la solución, se hidroliza. Sus productos evolucionan de izquierda a derecha conforme el pH aumenta tal y como se muestra en la siguiente reacción (ver Ecuación 18):



*Ecuación 18*

3. Los dos mecanismos de la coagulación son:
  - Neutralización.- existe una desestabilización de las cargas negativas del coloide por medio de la adición del coagulante (cargas positivas), provocando su aglomeración y formando flocs. Para este mecanismo, las dosis necesarias del coagulante son bajas.
  - Coagulación por barrido.- este mecanismo se lleva a cabo en condiciones de coagulante en exceso. Los hidróxidos de aluminio comienzan a formar flocs amorfos que, en su precipitación, arrastran al contaminante (Wiley, 2016; Hendricks, 2011; Mouedhen *et al.*, 2008; Duan y Gregory, 2002).

Por lo tanto, entre más bajo fue el pH, el mecanismo que predominó fue la coagulación por neutralización, provocada por la presencia de hidróxidos de aluminio con carga positiva ( $Al(OH)^{2+}$ ), favoreciendo la desestabilización eléctrica de las microalgas (carga negativa), generando su aglomeración y su posterior flotación por medio de las burbujas; mientras que, cuando el pH fue de 9, predominaron especies metálicas con carga negativa ( $Al(OH)_4^-$ ), por ende, la desestabilización de las microalgas con la misma carga fue inalcanzable.

A medida que el pH aumentó, la coagulación por barrido cobró mayor relevancia, provocando deficiencias en ER, ERS y ERF, donde la desestabilización de las microalgas para su remoción por flotación y sedimentación fue baja. No obstante, en ciertas ocasiones, en ERF, a pH 9 (experimentos 7 y 8 de los tres diseños de experimentos), la desestabilización de las microalgas se muestra lo suficientemente elevada para la generación de puentes entre sus partículas provocadas por la adición de un polímero; esto se le atribuye a una elevada dosis de coagulante (25 mg/L en este trabajo de investigación), por lo tanto, es posible concluir que, al agregar un polímero dentro o fuera del reactor:

- A un pH elevado (9 en este caso), no se aumenta la eficiencia de remoción de color sin una alta dosis de coagulante (25 mg/L).
- A un pH de 5.5 se logran eficiencias de un 90 a un 100%.

Lo anterior explica la significancia estadística del pH (factor C) en este proceso de ECF, incluyendo su interacción con el coagulante en el medio (BC).

#### **11.2.3.2 Concentración de microalgas**

Según los gráficos de Pareto (ver Figura 75), el factor (D) es uno de los más relevantes en la ECF, incluso más que factores como densidad de corriente y dosis de coagulante. Esto se explica bajo un simple principio: entre más coloides, mayor interacción con el coagulante y las burbujas (Wiley *et al.*, 2016; Azarian *et al.*, 2012; Ghernaout *et al.*, 2011). Entre mayor sea la concentración de partículas (microalgas), mayor será la superficie de adsorción y por ende, mayor probabilidad de que estas reaccionen con el coagulante, favoreciendo la formación de flocs. Esto se refleja en la significancia de la interacción BD (dosis de coagulante y concentración de microalgas).

#### **11.2.3.3 Dosis de coagulante**

Para comprender la significancia de este factor (B), es importante describir su participación en diferentes etapas del proceso (ER, ERS y ERF). A diferencia de tecnologías como DAF y coagulación química (CQ), la ECF es capaz de formar flocs mucho más estables y consistentes debido a la constante y homogénea liberación del coagulante (Moussa *et al.*, 2016; Mickova, 2015; Arzarian *et al.*, 2012), dos cualidades que describen la capacidad de los flocs para no deformarse o romperse, lo que favorece su separación por medio de:

- Flotación. La continua y simultánea liberación del coagulante y burbujas, provoca la eficiente desestabilización de los coloides y, al contacto con el gas, éstos son llevados a la superficie.
- Sedimentación. Los flocs que no logran interactuar con las burbujas, son arrastrados hasta el efluente y removidos en ERS y ERF.

De acuerdo a la Figura 75, en ER el factor B no resulta tan relevante como en las siguientes etapas. Si bien una adecuada desestabilización de los coloides no requiere altas dosis de coagulante, aumentar la concentración del mismo favorece el crecimiento de flocs, facilitando la remoción de los mismos por floculación y sedimentación en caso de que éstos no hayan sido removidos por flotación. Es por esto que la dosis de coagulante cobra protagonismo en las etapas de ERS y ERF.

En conclusión, si se pretende remover los flocs por medio de sedimentación (ya sea en ERS o ERF), la dosis de coagulante es un factor a considerar.

#### **11.2.3.4 Densidad de corriente**

Algunos autores consideran relevante controlar este factor si se quiere evitar un alto consumo energético (Golzary *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2010), otros lo describen como el responsable de dictar el nivel de mezclado en un proceso de ECF (Rojas *et al.*, 2018; Alam *et al.*, 2017; Cruz *et al.*, 2015), debido a la estrecha relación que tiene con la nucleación (formación de burbujas) y la coalescencia entre las mismas (formación de burbujas grandes a partir de la colisión de burbujas pequeñas); estos fenómenos tienen lugar en dos contextos distintos:

- En la superficie del electrodo. Suponiendo un área fija de electrodos y cierta corriente es aplicada, la densidad y tamaño de burbujas tendrán un valor determinado. A medida que el amperaje aumenta, la producción de burbujas también (Rojas *et al.*, 2018; Alam *et al.*, 2017; Cruz *et al.*, 2015; Golzary *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2010).
- En el seno del líquido. Una vez que las burbujas son liberadas de la superficie del electrodo, un menor tamaño y un mayor número provoca mejores índices de remoción debido a una mayor colisión con los flocs en el medio; sin embargo, un exceso de burbujas provocadas por densidades de corriente demasiado altas ( $>100 \text{ A/m}^2$ ), puede causar su coalescencia al momento de despegarse del electrodo (Alam *et al.*, 2017; Cruz *et al.*, 2015). Burbujas de mayor tamaño tienen menor superficie de contacto y por ende, menores tasas de remoción por flotación.

En este trabajo de investigación fue posible notar que este factor obtuvo mayor relevancia en una etapa de ER (dentro del reactor), donde su participación dictó la dinámica del medio al generar suficientes burbujas para efectuar un adecuado mezclado; por lo cual, se puede concluir que la producción y el tamaño de burbujas en el sistema propuesto fue apropiado bajo las condiciones de densidad de corriente ( $60 \text{ A/m}^2$ ) de estudio.

#### 11.2.3.4.1 Altura libre sobre electrodos

Tal y como lo muestran las pruebas preliminares (ver sección 9.4), y este análisis estadístico, además de un adecuado número y tamaño de burbujas, el mezclado en una torre de flotación depende de que los flocs y las burbujas cumplan lo siguiente:

- Prolonguen su interacción. En las pruebas de configuración fue posible observar un intenso mezclado, tanto en un flujo vertical ascendente como descendente (esto a las mismas densidades de corriente), sin embargo, al extender la distancia de contacto entre burbujas y flocs en una configuración de flujo vertical ascendente, los niveles de remoción fueron superiores (ver Figura 51 y Figura 56; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).
- Tengan una dinámica sin obstáculos. En la corrida 3 del nuevo diseño de experimentos (ver Tabla 24), se utilizaron placas de 1.03 m, las cuales, al ocupar gran parte de la altura del reactor, presentaron una adecuada distribución del coagulante y las burbujas; sin embargo, estos electrodos propiciaron flujos preferenciales en algunas partes del reactor, evitando que las burbujas y los flocs generados interactuaran libremente de manera lateral, restando eficiencia al proceso (ver Figura 76).

En este trabajo de investigación, la significancia de este factor se debe a que electrodos de menor tamaño (0.17 m) colocados al fondo del reactor (ver Figura 77), permitieron una interacción libre y extensa entre los flocs y las burbujas, esto puede observarse teóricamente en la Figura 73, donde la altura sobre electrodos cobra relevancia en ER.

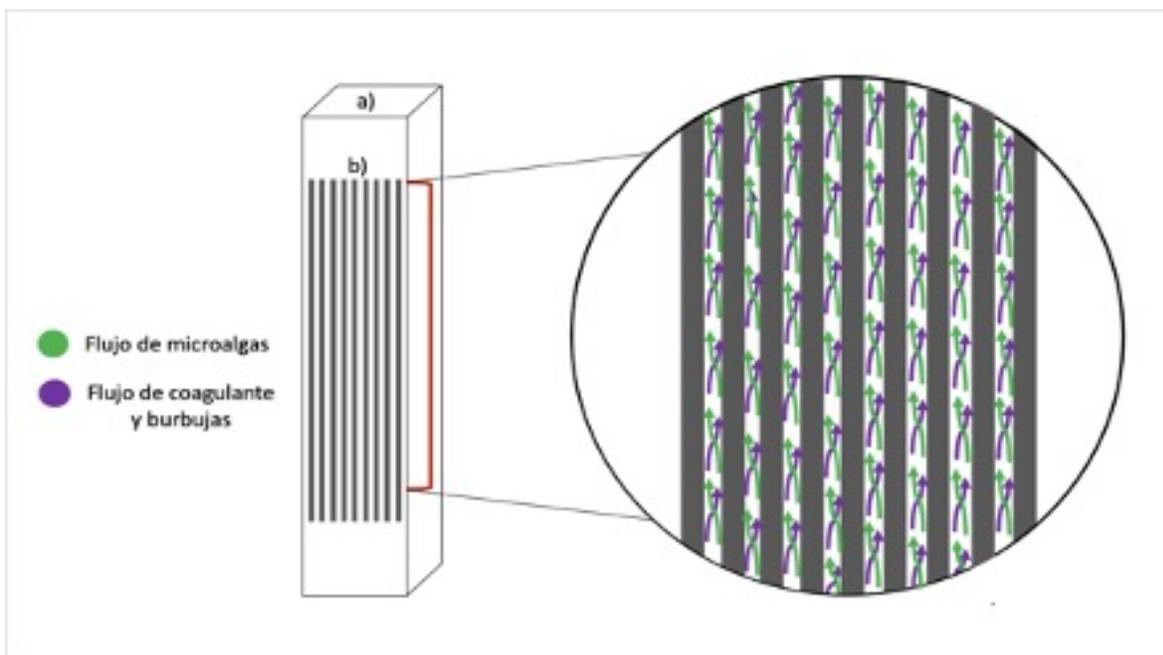


Figura 76. Dinámica de mezclado entre flujos con electrodos de 1.03 m. a): columna de flotación; b): posición de electrodos (elaboración propia).

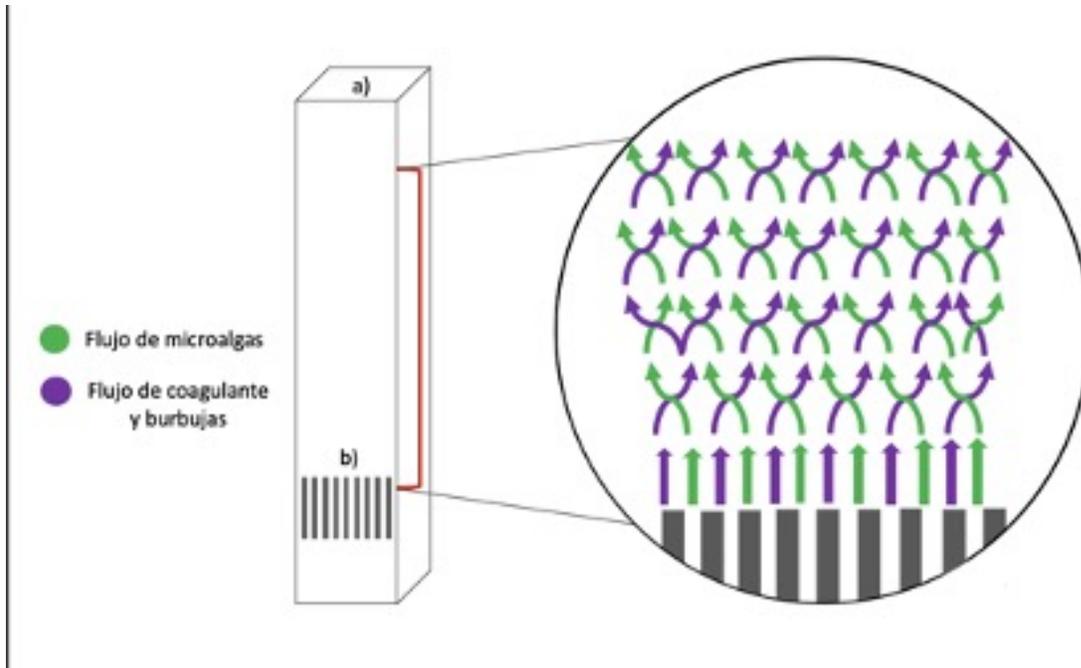


Figura 77. Dinámica de mezclado entre flujos con electrodos 0.17 m. a): columna de flotación; b): posición de electrodos (elaboración propia).

#### 11.2.4 Desarrollo de modelos estadísticos

A través del análisis de las variables planteadas y la interacción entre ellas, fue posible desarrollar modelos estadísticos capaces de deducir valores teóricos a cualquier concentración de clorofila-a.

Dichos modelos cumplen con la estructura planteada en la Ecuación 19:

$$y_i = b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + \dots + b_k x_{ki} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

$y_i$ : Es la variable dependiente o respuesta en cuestión (color aparente).

$b$ : Son las constantes numéricas calculadas para cada modelo.

$x$ : Son las variables independientes o los factores que afectan la respuesta.

$k$ : Es el factor involucrado.

$i$ : Son los niveles de las variables.

Con intención de conocer el nivel de ajuste de cada modelo, se utilizaron ciertos conceptos estadísticos:

- $F_0$ : Este estadístico (F de Fisher), es utilizado para conocer la significancia relativa del modelo, contrastando su valor con  $F_{est}$  (estadístico teórico encontrado en tablas de F). El modelo de regresión es significativo si  $F_0 > F_{est}$ .
- Error estándar del estadístico: Medida de la variación estándar de un estadístico (en este caso F de Fisher). A medida en que la variación sea menor, mejor será el ajuste.
- $R^2$ : Medida de la calidad del ajuste de la respuesta explicada por una regresión. Entre más cercano a 1 sea su valor, mejor será el ajuste (aceptable si  $R^2 > 0.8$ ).
- $R^2$  ajustada: Coeficiente de calidad de un ajuste de regresión, utilizado como corrección del mismo. Cuando un nuevo término es agregado al modelo, la  $R^2$  ajustada sólo aumenta si este nuevo participante mejora el modelo. Este estadístico resulta aceptable si  $R^2$  ajustada  $> 0.7$ .
- $R^2$  de la probabilidad normal de residuos ( $R^2$  del error): Este concepto se utilizó con intención de generar mayor certeza en la elección del mejor modelo. Cuanto más cercano sea este a 1, mejor será el ajuste a una distribución normal de los errores, lo que se interpreta como una mayor independencia entre los mismos.

Los valores de los conceptos estadísticos pueden observarse en la Tabla 36 y en la Tabla 37.

**Tabla 36. Modelos estadísticos con mejor ajuste en el análisis estadístico de la remoción de color aparente. Densidad de corriente como factor A (elaboración propia).**

Etapa	Modelo matemático	$F_0$	F est.	Error estándar del estadístico	$R^2$	$R^2$ (ajus)	$R^2$ (error)
ER	$y_i = 142.8 - 11.5A - 3.5B + 44.9C + 42.6 + 7.5AC - 8.2AD - 28.4BC - 8.6BD + 33.8CD - 4.22BCD + 9ABCD$	78.17	2.20	13.7	0.97	0.96	0.96
ERS	$y_i = 114.6 - 10.5A - 24.2B + 61.5C + 34.7D - 25BC - 10.3BD + 35.3CD$	79.28	2.36	19	0.95	0.94	0.98
ERF	$y_i = 52.6 - 0.083A - 24.7B + 50.8C + 24.4D + 2.08AB + 31.1CD - 8.9BCD - 28.5BC - 11.6BD$	26.26	2.25	25.4	0.89	0.86	0.96

**Tabla 37. Modelos estadísticos con mejor ajuste en el análisis estadístico de la remoción de color aparente. Altura libre sobre electrodos como factor A (elaboración propia).**

Etapa	Modelo matemático	F <sub>0</sub>	F est.	Error estándar del estadístico	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajus)	R <sup>2</sup> (error)
ER	$y_i = 142.2 - 22.9A - 15.1B + 42.2C + 51.3D + 12.7AC - 20.4AD - 22.01BC - 20.8BD + 41.6CD + 8.7ABD - 7.5BCD + 15.5ABCD$	73.04	2.20	13.6	0.97	0.96	0.98
ERS	$y_i = 128.8 - 29.8A - 43.7B + 61.5C + 29.2D + 17.1AB + 9.5AD - 24.1BC - 8.2ABD + 35.3CD - 5.2BCD$	50.1	2.22	20.7	0.95	0.93	0.99
ERF	$y_i = 45.4 + 6.5A - 18.06B + 49.7C + 14.02D - 16.08AB + 14.4AD - 28.1BC - 18.8ABD + 31.1CD - 8.9BCD - 2.1ABC$	24.17	2.20	23.7	0.91	0.88	0.97

### 11.3 REPETICIÓN DE LA MEJOR CONDICIÓN

Después de analizar los 3 diseños de experimentos, se realizó una corrida adicional en donde se repitieron las condiciones de operación con mayor remoción de color (corrida número 2 en los tres diseños de experimentos) y a una concentración de clorofila-a de 66 µg/L. Esta prueba tenía la intención de verificar que los resultados obtenidos en los tres diseños fueran repetibles a cualquier concentración de microalgas. A esta corrida se le llamó “mejor condición” y sus variables se muestran en la Tabla 38.

**Tabla 38. Condiciones de mejor condición a una concentración de clorofila-a de 66 µg/L (elaboración propia).**

Mejor condición									
Variables codificadas					Sin codificar				
A	B	C	D	A'	A (A/m <sup>2</sup> )	B (mg/L)	C	D (µg/L)	A' (m)
1	-1	-1	-0.83	1	60	10	5.5	66	0.87

Al terminar la prueba con la mejor condición, los valores de color obtenidos en las tres etapas (ER, ERS y ERF) fueron contrastados con su similar teórico, el cual fue deducido a partir de los modelos estadísticos plasmados en la Tabla 36 y en la Tabla 37.

En la caracterización del efluente se evaluaron los parámetros descritos en la Tabla 31 y se agregó la caracterización de aluminio en EF y ECF.

### 11.3.1 Resultados con la mejor condición

En la repetición de la mejor condición, la remoción de clorofila-a, feofitina-a y DQO en ER, fue del 91, 97 y 87% respectivamente, mientras que en ERF, fue de 99, 98 y 93%, lo que indica una eficiencia alta de remoción de color, sin embargo, las dosis de aluminio en una etapa ER y ERF, resultan por encima del límite máximo permisible (0.2 mg/L) establecido por la NOM-127-SSA1-1994, con 5.9 y 0.5 mg/L respectivamente (ver Tabla 40).

El ajuste estadístico resultó adecuado en cada uno de los modelos propuestos, obteniendo valores teóricos con un máximo de 17% de discrepancia en relación a los valores reales (ver Tabla 41), lo que permite concluir que es posible la predicción del alcance del sistema propuesto a cualquier concentración de clorofila-a, siempre y cuando se encuentre dentro del intervalo de estudio. En la Figura 78, se puede observar el resultado del proceso de ECF aplicado.

**Tabla 39. Condiciones iniciales de agua cruda en la repetición de la mejor condición (elaboración propia).**

Color	Clorofila-a	Feofitina-a	DQO	Dosis (aluminio)	pH	Conductividad
352 U Pt-Co	66 mg/L	17.5 mg/L	48.9 mg/L	10 mg/L	5.5	287.9 $\mu$ S/cm

**Tabla 40. Valores finales y eficiencias de remoción en la repetición de la mejor condición (elaboración propia).**

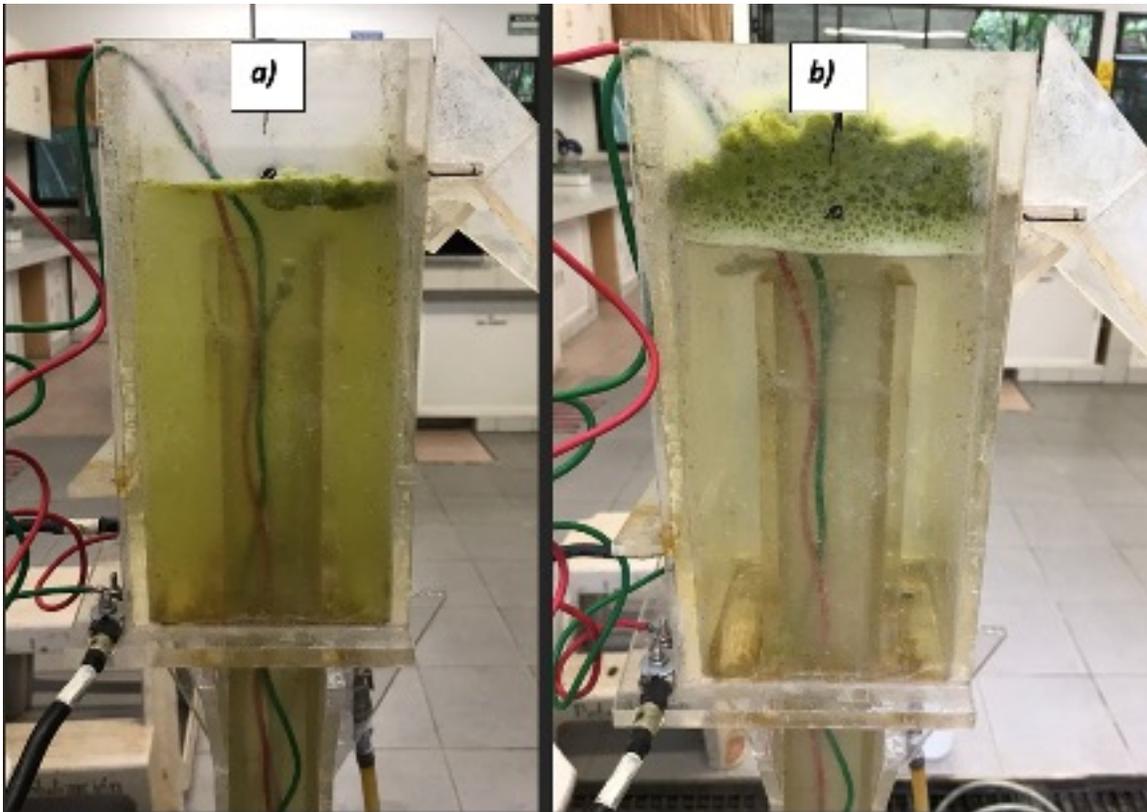
Parámetro	Etapa			
	ER		ERF	
	mg/L	% de remoción	mg/L	% de remoción
Clorofila-a	5.3	91	0.6	99
Feofitina-a	0.5	97	0.3	98
DQO	6.19	87	3.23	93
Aluminio	6	40	0.5	95
Color aparente (U Pt-Co)	48	86	0	100

**Tabla 41. Comparación de valor real vs valor teórico del color aparente en la prueba de la mejor condición (elaboración propia).**

Etapa	Color (U Pt-Co)		Diferencia
	Real	Teórico	%
Densidad de corriente como factor A			
ER	48	42	13
ERS	30	33	10
ERF	0	0	0

**Tabla 41. Comparación de valor real vs valor teórico del color aparente en la prueba de la mejor condición (elaboración propia).**

Etapa	Color (U Pt-Co)		Diferencia
	Real	Teórico	%
Altura sobre electrodos como factor A			
ER	48	56	17
ERS	30	34	13
ERF	0	0.1	0



**Figura 78. Resultados de repetición de mejor condición. a) Antes del tratamiento; b) Después del tratamiento.**

Este proyecto de investigación fue comparado con distintos estudios recientes enfocados específicamente en la remoción de microalgas con fines de potabilización; los proyectos descritos en la Tabla 42, hacen ajuste de pH, bajo esa premisa, la mejor condición presenta la siguientes ventajas:

- Una eficiencia de remoción de color aparente del 91% sin la adición de un polímero o cualquier sustancia que ayude a la formación de flocs.
- La aplicación de la menor dosis de coagulante (10 mg/L).

Por otro lado, comparando la mejor condición en ERF con los proyectos expuestos en la Tabla 42 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la principal ventaja es el porcentaje de remoción alcanzado, el cual es del 99%.

**Tabla 42. Comparación de los procesos aplicados para la remoción de microalgas en materia de potabilización (elaboración propia).  
N/E: No especificado.**

Proyecto	Clorofila-a	Densidad celular	Tecnología	Dosis de coagulante (Al <sup>3+</sup> )	Dosis de polímero	Eficiencia de remoción de color sin polímero	Eficiencia de remoción de color con polímero
Estudio de evaluación para el control de la floración de microalgas para restablecer el equilibrio en la red trófica en los embalses artificiales del bosque de Chapultepec (CONAGUA, 2015).	N/E	N/E	CQ	66 mg/L	1.5 mg/L	N/E	96%
Evaluation of the most promising techniques overcoming the algal problems takes place during the purification of drinking water (Mahmoud, <i>et al.</i> , 2021).	N/E	8467 org/ml	CQ	N/E	N/E	83.9 %	92%
Evaluación del tipo y densidad de microalgas, así como de las variables de operación, en la eficiencia de sistemas electroquímicos de potabilización (Ruiz, 2021).	N/E	7824 org/ml	ECF	21 mg/L	0.45 mg/L	N/E	98%
Remoción de microalgas mediante electrocoagulación/flotación en procesos de potabilización (Este trabajo de investigación).	139 µg/l	N/E	ECF	10 mg/L	0.4 mg/L	91%	99%

CQ= Coagulación química; ECF= Electrocoagulación/flotación

## 12 ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se calcularon los costos de la mejor condición (ver Tabla 38) y para homogeneizar las unidades el cálculo se hizo por m<sup>3</sup> de agua tratada. Es importante señalar que, para este análisis de costos, no se tomó en cuenta costo de mano de obra para la operación del sistema, ni los costos de inversión.

Los costos de operación considerados generalmente en la literatura se muestran en la Ecuación 7 (Hashim *et al.*, 2017; Papadopoulos *et al.*, 2019; Naje *et al.*, 2016).

Sin embargo, en este trabajo de investigación se consideró imprescindible incluir el precio del ácido para ajustar el pH del agua cruda y el costo del polímero (o floculante) utilizado en la etapa de ERF. De esta manera, la Ecuación 7 se transforma en la Ecuación 20:

$$\text{Costos de operación} = aC_{\text{energía}} + bC_{\text{electrodos}} + eC_{\text{ácido}} + gC_{\text{polímero}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

$C_{\text{energía}}$  = Consumo de energía

$C_{\text{electrodos}}$  = Consumo de electrodos

$C_{\text{ácido}}$  = Consumo de ácido

$C_{\text{polímero}}$  = Consumo de polímero

$a$  = Precio de la energía (\$/kWh).

$b$  = Precio del aluminio (\$/kg).

$e$  = Precio del ácido (\$/L)

$g$  = Precio del polímero (\$/g)

Los precios de los insumos fueron obtenidos por medio de cotizaciones realizadas a proveedores mexicanos en el año 2021 (Tabla 43). El precio de la energía fue obtenido del libro 41, del MAPAS (Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento) (CONAGUA, 2019).

**Tabla 43. Costos en moneda nacional (2021) de insumos utilizados para proceso de ECF (elaboración propia).**

$a$ : Precio de energía (\$/kWh)	$b$ : Precio del aluminio (\$/kg)	$e$ : Precio del ácido (\$/L)	$g$ : Precio del polímero (\$/kg)
1.53	127	350	90

El cálculo energético fue realizado por medio de la Ecuación 8.

El caudal de la corrida con el que se calcularon los costos fue de 2 L/min, que en m<sup>3</sup>/s se transforma de la siguiente manera:

$$2 \frac{L}{min} \left( \frac{m^3}{1000 L} \right) \left( \frac{60min}{1h} \right) = 0.12 \frac{m^3}{h}$$

Al sustituir dicho valor en la ecuación de energía (Ecuación 8) se obtiene:

$$C_{energía} = \left( \frac{3.62 A}{1} \right) \left( \frac{12 V}{1} \right) \left( \frac{h}{0.12 m^3} \right) = \frac{362 Wh}{m^3} \left( \frac{kWh}{1000 Wh} \right) = 0.362 kWh/m^3$$

En la mejor condición se utilizaron 10 mg/L de aluminio, un consumo que se muestra como el nivel -1 del factor B (dosis de aluminio). Su equivalencia a kg/m<sup>3</sup>, puede observarse en el análisis dimensional de la Ecuación 21. Es importante destacar que los electrodos utilizados fueron fabricados de la aleación de aluminio 3003, la cual basa su composición en 98.6% de aluminio, 1.2% de manganeso y 0.12% de cobre. Para fines de cálculo, se tomó una composición de aluminio del 100%.

$$C_{electrodos} = \left( 10 \frac{mg}{L} \right) \left( \frac{1 Kg}{1,000,000 mg} \right) \left( \frac{1000 L}{1 m^3} \right) = 0.01 kg/m^3 \quad \text{Ecuación 21}$$

Para realizar el ajuste de pH a 5.5, se utilizaron 15 mL de ácido sulfúrico concentrado (97%) en 200 L de agua cruda, por lo tanto, para 1 m<sup>3</sup> (1000 L) se requieren 75 mL aproximadamente, lo que equivale en L/m<sup>3</sup> a lo descrito en la Ecuación 22:

$$C_{ácido} = \left( 75 \frac{ml}{m^3} \right) \left( \frac{1 L}{1000 ml} \right) = 0.075 L/m^3 \quad \text{Ecuación 22}$$

La dosis necesaria de polímero para flocular 2 litros de agua fue de 0.4 mg/L, por lo tanto:

$$C_{polímero} = \left( 0.4 \frac{mg}{L} \right) \left( \frac{1000 L}{1 m^3} \right) \left( \frac{1 kg}{1,000,000 mg} \right) = 0.0004 kg/m^3 \quad \text{Ecuación 23}$$

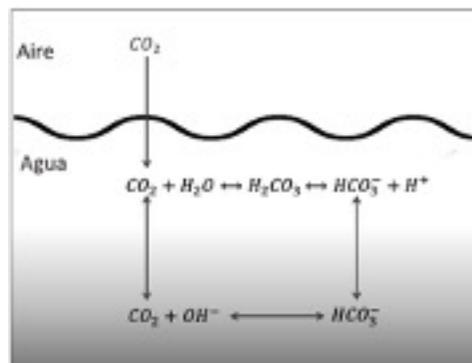
Sustituyendo los valores de la mejor condición en la Ecuación 20, los costos de esta corrida se describen a continuación:

$$\begin{aligned} & \text{Costos de operación} \\ & = \left( \frac{1.53\$}{kWh} \right) \left( \frac{0.362 kWh}{m^3} \right) + \left( \frac{127\$}{kg} \right) \left( \frac{0.01 kg}{m^3} \right) + \left( \frac{350\$}{L} \right) \left( \frac{0.075 L}{m^3} \right) \\ & + \left( \frac{90\$}{kg} \right) \left( \frac{0.0004 Kg}{m^3} \right) = 28.1 \text{ \$/m}^3 \end{aligned}$$

En esta propuesta de ECF, en la mejor condición, el consumo del ácido fue el responsable del 95% del costo total de la operación sistema (ver Tabla 44), por ello resulta indispensable conocer la causa de su aplicación.

En la literatura encontrada, ciertos autores recomiendan evitar esta manipulación del pH con la intención de reducir los costos del proceso. En la remoción de microalgas se recomienda utilizar cultivos de pH neutro o con tendencia a ácido (Parmentier *et al.*, 2019; Wiley *et al.*, 2016; Golzary *et al.*, 2015), sin embargo, en cultivos a cielo abierto esto no es posible, debido a que los cuerpos de agua naturales presentan valores de  $\text{pH} \geq 8$  (en este trabajo de investigación los cultivos presentaron niveles  $\geq 9$ ).

Un elevado pH se explica en gran parte, por el consumo de  $\text{CO}_2$  por las microalgas, lo que disminuye la concentración de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  y genera la acumulación de hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ) en el medio (ver Figura 79); concluyendo que, si se requiere realizar la remoción de microalgas por ECF, es posible omitir un ajuste del pH siempre y cuando los cultivos sean controlados por medio de la implementación de fotobiorreactores a escala laboratorio (rondando valores de pH 7 con tendencia a ácido); en cambio, si el cultivo es a cielo abierto, resulta imprescindible realizar el ajuste.



**Figura 79 Dinámica del dióxido de carbono en la interfaz aire-agua (modificado de “Karst Geochemistry and Hidrogeology”, 2014).**

Los resultados obtenidos con la mejor condición (corrida 2 en todos los diseños de experimentos), económicamente no son considerados como competentes en comparación con la literatura ( $28.1 \text{ MXN/m}^3 = 1.4 \text{ USS/m}^3$ ) (ver Tabla 44 y Tabla 45), por consiguiente, resulta lógico pensar que al disminuir o incluso desistir del ajuste de pH aumentaría la viabilidad económica del sistema, así que, además de analizar la corrida 2, se realizó su comparativa con la corrida 8 y 9 bajo los siguientes criterios:

- En la corrida 8, a pesar de resultar remociones menores a las de la corrida 2 (mejor condición), sus eficiencias son elevadas en ER, ERS y ERF (sin ajuste de pH), con remociones de 70, 80 y 87%, respectivamente.
- La corrida 9 tuvo remociones en ER, ERS y ERF, de 81, 83 y 96 % respectivamente, sin un ajuste riguroso del pH, disminuyéndolo de 9 a 7.

Los resultados de las corridas 2, 8 y 9, utilizados para esta comparativa fueron los obtenidos por la tercera corrida experimental (139  $\mu\text{g/L}$  de clorofila-a) (ver Tabla 29).

Al comparar con la literatura (ver Tabla 45), se demuestra que la corrida 8 es la más viable económicamente. Técnicamente también es competitiva esta condición de operación, con una eficiencia de remoción del 87% (siempre y cuando se mantenga la dosificación del polímero).

En cualquiera de los tres experimentos, la concentración utilizada de polímero y el costo del mismo, hacen de este insumo una atractiva opción para formar parte del reactor per sé.

En conclusión, si se requiere optimizar el costo de un proceso de ECF en la remoción de microalgas en un contexto real (considerando cultivos a cielo abierto), se recomienda prescindir de un ajuste de pH y optar por la adición de un polímero al proceso.

**Tabla 44. Análisis de costos (MXN) en tres condiciones de operación (elaboración propia).**

Exp.	Amperaje aplicado (A)	Voltaje promedio demandado (V)	Dosis de aluminio (mg/L)	pH	Costo de energía (\$/m <sup>3</sup> )	Costo de aluminio (\$/m <sup>3</sup> )	Costo de ácido (\$/m <sup>3</sup> )	Costo polímero (\$/m <sup>3</sup> )	Costo total operación (\$/m <sup>3</sup> )	% de remoción		
										ER	ERS	ERF
2	3.62	12	10	5.5	0.07	1.27	26.25	0.04	28.1	91	94	99
8	9.05	14	25	9	0.19	3.18	0	0.04	4.8	70	80	87
9	6.34	10	18	7	0.10	2.29	15.75	0.04	18.9	81	83	96

**Tabla 45. Sistemas de ECF para la remoción de microalgas (elaboración propia).**

Tipo de reactor	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	Dosis de aluminio teórica (mg/L)	pH óptimo	Concentración de microalgas	Altura libre sobre electrodos (cm)	Consumo energético (kWh/m <sup>3</sup> )	Costos de operación (US\$/m <sup>3</sup> )	% de remoción	Referencia
Batch	10	15	4 a 7	Baja (entre 0.55x10 <sup>9</sup> y 1.55x10 <sup>9</sup> células/L)	N/A	0.4	N/A	100	Gao <i>et al.</i> , 2010
Batch	10	N/A	6	N/A	N/A	0.067	0.13	96.8	Golzary <i>et al</i> 2015
Continuo	N/A	6	5.65	N/A	N/A	1.25	N/A	95	Wiley <i>et al.</i> , 2016
Continuo (ECF)	12	10	7.2	N/A	25	N/A	0.09	73	Parmentier <i>et al.</i> , 2020
Continuo	60	10	5.5	Alta (entre 59 y 139 µg/L)	87	0.362	1.4	99	Corrida 2
Continuo	60	25	9	Alta (entre 59 y 139 µg/L)	87	1.056	0.2	87	Corrida 8
Continuo	42	18	7.25	Alta (entre 59 y 139 µg/L)	87	0.528	0.9	96	Corrida 9

### 13 CONCLUSIONES

La factibilidad del sistema propuesto se puede analizar desde dos puntos de vista:

- 1) Técnico y económico. Si se considera la mejor condición (ver Tabla 30), el proceso es capaz de remover microalgas hasta un 99%, siempre y cuando el pH en el agua problema sea 5.5 y se adicione polímero al proceso; sin embargo, económicamente queda en desventaja con lo reportado en la literatura, debido al costo de ajustar el pH. Por otro lado, sacrificar eficiencia al no ajustar el pH, permite disminuir los costos hasta un nivel competitivo, con eficiencias adecuadas en la remoción de microalgas (Tabla 45).
- 2) Efecto a la salud. Dosis de aluminio por encima de 10 mg/L resultan en efluentes con concentraciones de 6 mg/L y 0.5 mg/L en ER y ERF respectivamente. Si se requiere cumplir con la NOM-127 se tiene que optimizar la dosis y/o la precipitación del aluminio en el efluente, para pensar en su remoción mediante algún sistema de filtración.

En conclusión, el diseño y la aplicación del dispositivo experimental, resulta eficiente técnicamente en comparación con tecnologías enfocadas en la remoción de microalgas para la potabilización del agua; sin embargo, es importante tener en cuenta que es necesario mejorar la viabilidad económica y de salud del sistema. Por ello en la sección 14, se realizan una serie de recomendaciones que podrían volver más atractivo el proceso.

## 14 RECOMENDACIONES

Con intención de aumentar la competitividad del proceso de ECF en la remoción de microalgas, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Integrar y evaluar una etapa de ERF dentro del reactor a diferentes concentraciones de polímero. Esto puede traer consigo una disminución en la necesidad de ajustar el pH (por lo tanto una reducción en los costos del proceso), además de restar aluminio en el efluente, volviendo viable el cumplimiento de la modificación del año 2000 a la NOM-127 SSA-1994.
- Optimizar la dosis de aluminio dentro del reactor (considerando la inevitable sobreproducción del coagulante debido a la disolución del cátodo), con intención de disminuir su dosis y de esta manera aprovechar la mayor parte del mismo dentro del sistema; evitando así su salida al efluente.
- Considerar la inclusión de una etapa posterior de filtración en arena, con intención de disminuir el aluminio en el efluente y cumplir con la normatividad aplicable en materia de potabilización (modificación del año 2000 a la NOM-127 SSA-1994).

## 15 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campos, T., Burgardt, T., Aparecida, A., & Sens, M. (2020). Electroflotation treatment system with down-flow granular filtration (Electroflot-filter) for cyanobacteria removal in drinking water. *Desalination and Water Treatment*, 76-83.
- Landels, A., Beachmam, T., Evans, C., Carnovale, G., Raikova, S., Cole, I., . . . Allen, M. (2019). Improving electrocoagulation floatation for harvesting microalgae. *Algal Research*, 101446 .
- Canto, J. (2018). *Modelación hidráulica de reactores de electrocoagulación con flujo vertical bifásico*. Ciudad de México : UNAM.
- Castro, E. (2013). *Sistema de abatimiento de olor planta de tratamiento de agua potable Concón-Esval*. Valparaiso: Pontifica Universidad Católica de Valparaiso.
- Chen, S., & Posten, C. (2016). *Microalgae Biotechnology*. Beijing: springer.
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. Oregon: John Wiley & Sons.
- Chew, K., Chia, S., Krishnamoorthy, R., Tao, Y., Chu, D., & Show, P. (2019). Liquid biphasic flotation for the purification of C-phycoerythrin from *Spirulina plantensis* microalga. *Bioresource Technology* , 288-296.
- Liyui, R., Yimin, Z., Qin, W., Shenxu, B., Peipei, W., & Congren, Y. (2014). Investigation of condition-induced bubble size and distribution in electroflotation using a high-speed camera. *International Journal of Mining Science and Technology*, 7-12.
- Liyui, R., Yimin, Z., Wenqing, Q., Shenxu, B., Peipei, W., & Congren, Y. (2014). Investigation of condition-induced bubble size and distribution in electroflotation using a high-speed camera. *International Journal of Mining Science and Technology* , 7-12.
- CONAGUA. (2015). *Estudio de evaluación para el control de la floración de microalgas para restablecer el equilibrio en la red trófica en los embalses artificiales del bosque de Chapultepec*. Ciudad de México : SEMARNAT/CONAGUA.
- CONAGUA. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Eficiencia Energética, Uso Eficiente y Ahorro de la Energía*. Ciudad de México : SEMARNAT/CONAGUA.

- Contreras, C., Peña, J., Flores, L., & Cañizares, R. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*, 450-456.
- Christenson, L., & Sims, R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology Advances*, 696-702.
- López, R., Coreño, O., & Nava, J. (2019). Abatement of hydrated silica and simultaneous removal of coexisting ions from deep well water by electrocoagulation using an up-flow reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 100923.
- Alam, R., & Shang, J. (2017). Bubble size distribution in a laboratory-scale electroflotation study. *Environ Monit Assess*, 189-193.
- Alam, R., Shang, J., & Hossain, A. (2017). Bubble size distribution in a laboratory-scale electroflotation study. *Environ Monit Assess*, 189-193.
- Acosta, A., & Valentina. (2011). *Flexibilidad fenotípica de la cianobacteria invasora *Cylindrospermopsis raciborskii* a las fluctuaciones en la disponibilidad de fosfato*. Montevideo : Universidad de la República de Uruguay.
- Al-Qodah, Z., & Al-Shannag, M. (2017). Heavy metal ions removal from wastewater using electrocoagulation processes: A comprehensive review. *Separation science and technology*, 2649-2676.
- An, J., Li, N., Wang, S., Liao, C., Zhou, L., Li, T., . . . Feng, Y. (2019). A novel electro-coagulation-Fenton for energy efficient cyanobacteria and cyanotoxins removal without chemical addition. *Journal of Hazardous Materials*, 650–658.
- Azarian, G., Mesdaghinia, A., Vaezi, F., Nabizadeh, R., & Nematollahi, D. (2012). Algae Removal by Electro-coagulation Process, Application for Treatment of the Effluent from an Industrial Wastewater Treatment Plant. *Iranian Journal of Public Health*, 57-64.
- Bajerle, F., Danielle, J., Souza, M., Bjerck, T., Moraes, M., Hoeltz, M., . . . Schneider, R. (2015). Biomass from microalgae separation by electroflotation with iron and aluminum spiral electrodes. *Chemical Engineering Journal*, 274-2981.
- Bakheet, B. (2018). *Optimizing electrochemical treatment of cyanobacteria and cyanotoxins*. Belal Bakheet: Monash University.
- Barrado, M. (2016). *Eliminación de microalgas de las aguas mediante métodos físicos y químicos*. Extremadura: Universidad de Extremadura .

- Barrera, C. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. Ciudad de México : Reverté.
- Barrera, C. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. Ciudad de México: Reverté.
- Barros, A. I., Gonçalves, A. L., Simoes, M., & Pires, J. (2015). Harvesting techniques applied to microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1489-1500.
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology*. Pisa: CRC.
- Benavente, J., Montañez, J., Aguilar, C., Méndez, A., & Valdivia, B. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. *Revista Científica de la Universidad de Autónoma de Coahuila*, 1-11.
- Bravo, L., & Tomasini, C. (2017). *Experiencias en la determinación de Clorofila-a y feopigmento por espectrofotometría*. Jiutepec: IMTA.
- Dávila, C. (s.f.). *Obtención de bioetanol a partir de biomasa microalgal cultivada en agua residual compleando ozonificación como método de cosecha*. UNAM.
- Dávila, B. (2016). *Obtención de bioetanol a partir de biomasa microalgal cultivada en agua residual empleando ozoflotación como método de cosecha*. Ciudad de México: UNAM.
- Da Cruz, G. S., Dutra Achilles, J., & Monte, B. M. (2015). The influence of some parameters on bubble average diameter in an electroflotation cell by laser diffraction method. *Journal fo environmental chemical engineering*, 1-7.
- Dassey, A. (2013). *Designing a cost effective microalgae harvesting strategy for biodiesel production with electrocoagulation and dissolved air flotation*. Indianapolis: Doctoral dissertations.
- Dockko, S. H. (2014). Fundamental characteristics of bubbles and ramifications for the flotation process. *Water Science and Technology*, 2007-2014.
- Donante, A. (2010). *Principios de electricidad y electrónica III*. Ciudad de México : Marcombo.
- Duan, J., & Gregory, J. (2002). Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in colloid and interface science*, 475-502.
- Dunn, K. (2018). *Process Improvement Using Data*. Quebec: Kevin Dunn.
- Eduardo, J. L., Querios Zepka, L., & María Isabel, Q. (2018). *Energy from microalgae*. Santa María : Springer.

- Essadki, A., Bennajah, M., Gourich, B., Vial, C., Azzi, M., & Delmas, H. (2008). Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor— Application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 1211-1223.
- Fowler, & Richard. (2000). *Electricidad: principio y aplicaciones*. Ciudad de México : McGrawHill.
- Fuente, D. I., Alejandro, Muro, A., Merchán, F., Madrid, F., Pérez, J., & Undabeyita, T. (2019). Electrocoagulation/flocculation of cyanobacteria from surface waters. *Journal of Cleaner Production*, 117964.
- Gao, S., Du, M., Tian, J., Yang, J., Ma, F., & Nan, J. (2010). Effects of chloride ions on electro-coagulation-flotation process with aluminum electrodes for algae removal. *Journal of Hazardous Materials*, 827-834.
- Gelover, S., Pérez, S., Martín, A., Montes, A., & Ivan, V. (2014). Current density as a master variable in designing reactors. *Procedia Chemistry*, 66-72.
- Gerardo, M. I., Van Den Hende, S., Vervaeren, H., Coward, T., & Skill, S. C. (2015). Harvesting of microalgae within a biorefinery approach: A review of the developments and case studies from pilot-plants. *Algal Research*, 248-262.
- Ghernaout, D., Benblidia, C., & Khemic, F. (2014). Microalgae removal from Ghrib Dam (Ain Defla, Algeria) water by electroflotation using stainless steel electrodes. *Desalination and Water Treatment*, 3328-3337.
- Ghernaout, D., Naceur, M., & Ghernaout, B. (2012). A review of electrocoagulation as a promising coagulation process for improved organic and inorganic matters removal by electrophoresis and electroflotation. *Desalination and Water Treatment*, 37-41.
- Golzary, A., Imanian, S., Abdoli, M., Khodadadi, A., & Karbassi, A. (2015). A cost-effective strategy for marine microalgae separation by electro-coagulation–flotation process aimed at bio-crude oil production: Optimization and evaluation study. *Separation and Purification Technology*, 156-165.
- Gomes, R., Gilmar, José Carantho, M., Colzi, A., Fares, E., Rosas, C., & Bezerra, A. (2014). Microalgae harvesting and cell disruption: a preliminary evaluation of the technology electroflotation by alternating current. *Water Science & Technology*, 315-320.
- González, M., Velásquez, B., Valdez, I., & Orta, T. (2020). Intensified recovery of lipids, proteins, and carbohydrates from wastewatergrown microalgae *Desmodesmus* sp. by using ultrasound or ozone. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 104852.

- Grisol, S., Dutra, A., & Monte, M. (2015). The influence of some parameters on bubble average diameter in an electroflotation cell by laser diffraction method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1-7.
- Guadayol, M., Cortina, M., Guadayol, J., & Caixach, J. (2015). Study of the presence of geosmin in bottled mineral water by CLSA and GC-MS. *Afinidad LXXII*, 177-181.
- Guamán, M., & González, N. (2016). *Catálogo de microalgas y cianobacterias de agua dulce del Ecuador*. Quito: Corporación para la investigación energética
- Guerrero, S., & Candelo, E. (2011). *Análisis de circuitos eléctricos*. Barranquilla: Universidad del norte.
- Gómez, A. (2015). Análisis espectral del Lago de Guadalupe, mediante imágenes de satélite y datos in situ. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 15-24.
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. Ciudad de México : McGrawHill.
- Hailjaoui, N., Ksentini, I., Kotti, M., & Mansour, B. (2019). Experimental study of current density and liquid phase electric conductivity effects on bubble size distribution in an electroflotation column. *Russian journal of electrochemistry*, 523-528.
- Hashim, K., Shaw, A., Al Khaddar, R., Ortoneda, M., & Phipps, D. (2017). Iron removal, energy consumption and operating cost of electrocoagulation of drinking water using a new flow column reactor. *Journal of Environmental Management*, 98-108.
- Hendrick, D. (2011). *Fundamentals of water treatment unit processes: Physical, Chemical, and biological*. USA: IWA publishing.
- Hernández, A., & Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 157-173.
- Hossei, A., Al-din Ebrahimi, S. J., Mesdaghinia, A., Gharibi, H., & Hossei Sowlat, M. (2011). Performance evaluation of a continuous bipolar electrocoagulation/electrooxidation–electroflotation (ECEO–EF) reactor designed for simultaneous removal of ammonia and phosphate from wastewater effluent. *Journal of Hazardous Materials*, 1267-1274.
- Huerta, G., M., R., Orta, V., S.B., Vazquez, V., & Orta Ledesma, M. (2020). Intensified recovery of lipids, proteins, and carbohydrates from wastewater-grown microalgae *Desmodesmus* sp. by using ultrasound or ozone. *Ultrasonics - Sonochemistry*.

- Issaoui, R. M. (2019). Experimental study of temperature effects on bubble characteristics and gas holdup in electroflotation column. *Desalination and water treatment*, 186-192.
- Issaoui, R., Ksentini, I., Kotti, M., & Ben Mansour, L. (2017). Effect of Current Density and Oil Concentration on Hydrodynamic Aspects in Electroflotation Column During Oil/Water Emulsion Treatment. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 166-170.
- Jacob, E., Queiroz, L., & Isabel, Q. (2018). *Energy from microalgae*. Santa María: Springer.
- Kim, K., Shin, H., Moon, M., & Ryu, B.-M. (2015). Evaluation of various harvesting methods for high-density microalgae. *Bioresource Technology*, 828-835.
- Kotti, M., Ksentini, I., & Ben Mansour, L. (2013). Bubble hydrodynamic influence on oxygen transfer rate at presence of cationic and anionic surfactants in electroflotation process\*. *Journal of hydromatics*, 747-754.
- Kwak, D., Jung, H., Known, S., Lee, E., Won, C., Lee, J., & Yoo, J. (2019). Rise velocity verification of bubble-floc agglomerates using population balance in the DAF process. *Journal of water supply*, 85-94.
- Márquez, R., Aguirre, A., & Figueroa, G. (2017). Evaluación del estado trófico en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada del Este, Campeche, México. *Hidrobiología*, 281-291.
- Mahmoud, E., Mohamed, A., El Hay, A., & Aboeldahb, S. (2021). Evaluation of the most promising techniques overcoming the algal problems takes place during the purification of drinking water. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-10.
- Martinez Navarro, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Castilla: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Martínez Navarro, F. (2017). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Castilla: Universidad Castilla-La Mancha.
- Mejri, M., Ksentini, I., Kotti, M., & Ben Mansour, L. (2018). Studying the hydrodynamics in a three-phase electroflotation column. *Desalination and Water Treatment*, 150-156.
- Membrillo, A., Torres, M. A., Alcocer, J., Prol, R. M., Oseguera, L., & Ruíz, J. (2016). Trophic State Index estimation from remote sensing of lake Chapala, México. *Revista Mexicana de ciencias geológicas*, 183-191.

- Mickova, I. (2015). Advanced Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. Part II: Electro-Flocculation and Electro-Flotation. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 273-294.
- Mohtashami, R., & Shang, J. (2019). Treatment of automotive paint wastewater in continuous-flow electroflotation reactor. *Journal of Cleaner Production*, 335-346.
- Monroy, E. (8 de Diciembre de 2021). *Karst Geochemistry and Hidrogeology*. Obtenido de Karst Geochemistry and Hidrogeology: <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/>
- Mouedhen, G., Feki, M., De Petris Wery, M., & Ayedi, H. (2008). Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 124-135.
- Mouedhen, G., Feki, M., De Petris Wery, M., & Ayedi, H. (2008). Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *ScienceDirect*, 124-135.
- Moussa, D., El-Nass, M., Nasser, M., & Al Marri, M. (2016). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 1-18.
- Muylaert, K., Bastiaens, L., Vandamme, D., & L., G. (2017). Harvesting of microalgae: Overview of process options and their strengths and drawbacks. En C. González Fernández, & R. Muñoz, *Microalgae-based biofuels and bio products* (págs. 114-127). Cambridge: Elsevier.
- Naje, A., Chelliapan, S., Zakaria, Z., & Abbas, S. (2016). Electrocoagulation using a rotated anode: A novel reactor design for textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 34-44.
- Nguyen, D., Yoon, S., Bui, T., Kim, S., Chang, W., Guo, W., & Ngo, H. (2016). Influences of operational parameters on phosphorus removal in batch and continuous electrocoagulation process performance. *Environ Sci Pollut Res*, 549-556.
- Niaghi, M., Mahmood, M., & Reza, G. (2015). Optimization of dissolved air flotation technique in harvesting microalgae from treated wastewater without flocculants addition. *JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY*, 1-17.
- Oh, S. H., Kang, S., Nam, S., Kim, E.-J., & Hwang, T.-M. (2019). CFD modelling of cyclonic-DAF (dissolved air flotation) reactor for algae removal. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 477-481.
- OMS. (2011). *Guía para la calidad del agua de consumo humano*. Ginebra: OMS.

- Orta, M., Monje, I., Velasquez, S., Rodriguez, V., & Yáñez, I. (2017). Ozone for Microalgae Biomass Harvesting from Wastewater. *OZONE: SCIENCE & ENGINEERING*, 264-272.
- Pamentier, D., Manhaeghe, D., Baccini, L., & Van Meirhaeghe, R. (2020). A new reactor design for harvesting algae through electrocoagulationflotation in a continuous mode. *Algal Research*, 101828.
- Papadopoulos, K., Argyriou, R., Economou, C., Charalampous, N., Dailianis, S., Tatoulis, T., . . . Vayenas, D. (2019). Treatment of printing ink wastewater using electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*, 442-448.
- Piña, S., Martín, A., Gonzáles, C., Prieto, F., Guevara, A., & Farcía, J. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista mexicana de ingeniería química* , 257-271.
- Ramos, J. (2014). *Obtención de modelos de estimación de clorofila-a e índice de estado trófico para el embalse villa victoria Edo. México aplicando técnicas de percepción remota*". Ciudad de México: UNAM.
- Restrepo, A., Arango, A., & Garcés, L. (2006). Electrocoagulación: Retos y oportunidades en el tratamiento de aguas . *Producción + limpia*, 60-77.
- Reza, M., & Shang, J. (2019). Treatment of automotive paint wastewater in continous-flow electroflotation reactor. *Journal of Cleaner Production*, 335-346.
- Rivera Huerta, M., Piña Soberanis, M., Martín Domínguez, A., & Pérez Castrejón, S. (2006). *Aplicación de electrocoagulación para la remoción de arsénico*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rivera, C., Zapata, Á., Pinilla, G., Donato, J., Chaparro, B., & Jiménez, P. (2005). Comparación de la estimación de la clorofila-a mediante los métodos espectrofotométricos y fluorométrico. *Acta Biológica Colombiana*, 95-102.
- Rojas, R., Gutiérrez, A., Bianchini, H., & Torem, M. (2018). Measurement and analysis of H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> bubbles diameter produced by electroflotation processes in a modified Partridge- Smith cell. *Powder technology*, 1-14.
- Roset, J., Aguayo, S., & Muñoz, M. (2001). Detección de cianobacterias y sus toxinas. *Revista de toxicología* , 65-71.
- Ruiz, G. (2021). *Evaluación del tipo y densidad de microalgas, así como de las variables de operación, en la eficiencia de sistemas electroquímicos de potabilización*. Jiutepec, Morelos: IMTA.
- Ruiz, M. (2017). *Análisis comparativo de índices de eutrofización en lagunas costeras del estado de Sonora, México*. La paz: CIB.

- Schüringm, J., Schulz, H., Fischer, W., & Böttcher, J. (2000). *REDOX: Fundamental, processes and applications*. Berlín: Springer.
- Sahu, O., Mazumdar, B., & Chaudhari, P. (2014). Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review Omprakash Sahu & Bidyut Mazumdar & P. K. Chaudhari Received: 1 July 2013 /Accepted: 30 September 2013 /Published online: 17 November 2013 # Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013 Abstract The electro. *Environ Pollut Res*, 2397-2413.
- Sanchez, E., Cardenas, I., Contreras, J., García, J., Barajas, A., & Zuurro, A. (2020). An Innovative Low-Cost Equipment for Electro-Concentration of Microalgal Biomass. *applied sciences*, 1-19.
- Sengül, A., Tüfekci, N., & Aktan, S. (2016). The use of alum as coagulate for removing cyanobacterial cells in drinking water. *Desalination and water treatment*, 1-7.
- Shen, Y., Fan, C., & Cheb, X. (2014). An auto-flocculation strategy for *Chlorella vulgaris*. *Biotechnol Lett*, 1-6.
- Souza, L., Ribeiro, P., & Antonio, L. (2020). Microalgae harvesting from wastewater by pH modulation and flotation: Assessing and optimizing operational parameters. *Journal of Environmental Management*, 109825.
- Souza, L., Teresa, M., & Antonio, L. (2019). Coagulation and dissolved air flotation as a harvesting method for microalgae cultivated in wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 100947.
- Standard Methods. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington: Leonore S. Clesceri .
- Suarez, J., Jácome, A., & Ures, P. (2015). *Electrocoagulación-electroflotación*. Coruña: Universidad de Coruña.
- Swanepoel, A., Preez, D., & Cloete, N. (2017). The occurrence and removal of algae (including cyanobacteria) and their related organic compounds from source water in Vaalkop Dam with conventional and advanced drinking water treatment processes. *Water SA*, 67-80.
- Tchamango, S. R., & Darchen, A. (2018). Investigation and optimization of a new electrocoagulation reactor with horizontal bipolar electrodes: Effect of electrode structure on the reactor performances. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4546-4554.
- Tchobanogloues, G., Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., & Howe, K. (2012). *MWH's: Water treatment principles and design*. USA: John Wiley & Sons, Inc.

- Vázquez, G., Favila, M., Madrigal, R., Montes, C., Baltanás, A., & Bravo, M. (2004). Limnology of crater lakes in Los Tuxtlas, Mexico. *Hydrobiología*, 59-70.
- Valeriano Gonzales, M. T. (2018). *Cosecha de microalgas mediante flotación por ozono-aire para la producción potencial de biodiesel*. Ciudad de México: UNAM.
- Velasquez, S., Garcia, R., Monje, J., Harvey, A., & Orta, M. (2014). Microalgae harvesting using ozoflotation: Effect on lipid and FAME recoveries. *ScienceDirect*, 1-8.
- Vera, M., Hernández, V., Alcocer, J., Ardiles, V., & Oseguera, L. (2015). Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas. *Tendencias de Investigación en Limnología Tropical*, 107-114.
- Visigalli, S., Barberis, M., Turolla, A., & Canziani, R. (2021). Electrocoagulation–flotation (ECF) for microalgae harvesting – A review. *Separation and Purification Technology*, 1-23.
- Walker, H. (2015). *Harmful algae blooms in drinking water*. Nueva York: CRC Press.
- Wang, H., Jiang, J., Xu, R., & Li, F. (2011). Treatment of landscape water (LSW) by electrocoagulation process. *Desalination and Water Treatment*, 62–68.
- Wiley, P., & Jonathan, T. (2016). Clarification of algae-laden water using electrochemical processes. *Water Science & Technology: Water Supply*, 314-323.
- Yanez, I., Orta, M. T., & Ramírez, R. M. (2009). Técnica Eficaz y de Bajo Costo para Cuantificar los Metabolitos Responsables de Olor y Sabor en Agua Potable. *Agua Latinoamérica*, 1-4.
- Yang, J., Tian, J., Ma, F., Tu, G., & Moan, D. (2010). Electro-coagulation–flotation process for algae removal. *Journal of hazardous materials*, 336-3343.
- Zat, M., & Benetti, A. (2010). Removal of the odoriferous compounds geosmin and 2-methylisoborneol from drinking water by the processes of cascade aeration, air stripping and nanofiltration. *Eng Sant Ambient*, 353-359.