**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

UANL

# APROVECHAMIENTO DE EFLUENTES Y LODOS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ MEDIANTE EL USO DE *Arthrospira platensis* Y MICROORGANISMOS ANAEROBIOS PARA BIORREMEDIACIÓN, GENERACIÓN DE BIOCARBÓN Y PRODUCCIÓN DE METANO

**Por**

**AARÓN ALTAMIRANO SALCIDO**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de**
**MAESTRÍA EN CIENCIAS con ORIENTACIÓN en**
**Ingeniería en Biosistemas**
**Marzo, 2026**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

# APROVECHAMIENTO DE EFLUENTES Y LODOS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ MEDIANTE EL USO DE *Arthrospira platensis* Y MICROORGANISMOS ANAEROBIOS PARA BIORREMEDIACIÓN, GENERACIÓN DE BIOCARBÓN Y PRODUCCIÓN DE METANO

**Por**

**AARÓN ALTAMIRANO SALCIDO**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de**
**MAESTRÍA EN CIENCIAS con ORIENTACIÓN en**
**Ingeniería en Biosistemas**
**Marzo, 2026**

**APROBACIÓN DE TESIS**

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL COMITÉ PARTICULAR
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
INGENIERÍA EN BIOSISTEMAS

COMITÉ PARTICULAR

Celestino García Gómez

Director de Tesis

Daniel Simón Olivo Alanís

Co-Director de Tesis

Julia Mariana Márquez Reyes

Asesora de Tesis

Noemí Nava Valente

Tutora de Tesis

Ph.D. Francisco Zavala García

Subdirector de Posgrado e Investigación

ESTA TESIS FUE APROBADA EN FORMATO, POR EL COMITÉ DE POSGRADO, ATENDIENDO A EL ARTÍCULO 123, DEL REGLAMENTO GENERAL DEL SISTEMA DE POSGRADO DE LA UANL.

COMITÉ DE POSGRADO

Ph. D. Francisco Zavala García
Presidente

Dra. Nelly Cristina Ramírez Grimaldo
Secretaria

Dra. Lidia Rosaura Salas Cruz
Vocal

Ph.D. Rigoberto Eustacio Vázquez Alvarado
Vocal

Ph.D. Emilio Olivares Sáenz
Vocal

Dra. Sugey Ramona Sinagawa García
Vocal

Dr. Guillermo Niño Medina
Vocal

**LUGAR DE INVESTIGACIÓN**

UANL

**APROVECHAMIENTO DE EFLUENTES Y LODOS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ MEDIANTE EL USO DE *Arthrospira platensis* Y MICROORGANISMOS ANAEROBIOS PARA BIORREMEDIACIÓN, GENERACIÓN DE BIOCARBÓN Y PRODUCCIÓN DE METANO**

**Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Remediación Ambiental y Análisis de Suelos, Plantas y Aguas del Departamento de Ingeniería en Biosistemas, en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, bajo la Dirección del Dr. Celestino García Gómez y la Codirección del Dr. Daniel Simón Olivo Analís.**

Celestino García Gómez

Director de Tesis

Daniel Simón Olivo Alanís

Co-Director de Tesis

## AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceras gracias al Dr. Celestino García Gómez por haber hecho tanto por mí desde hace ya 4 años que tengo de conocerlo. Él es todo un ejemplo de hombre, de investigador, de líder, de persona. Fue un gran honor y gusto haber sido su estudiante y él sabe que siempre podrá contar conmigo. Muy agradecido con el Dr. Daniel Simón Olivo Alanís por haber sido conmigo un excelente maestro en lo profesional y en lo personal. Me encantó trabajar con él e igualmente él podrá contar con mi apoyo cuando lo necesite. Agradezco a la Dra. Julia Mariana Márquez Reyes por sus comentarios y observaciones que fueron de mucha utilidad para retroalimentar la investigación. Muchas gracias a la Dra. Noemí Nava Valente por haberme apoyado de manera tan cordial con respecto a dudas y preguntas del trabajo en laboratorio. Les agradezco a mis maestros, los doctores Julio Beltrán, Gerardo Méndez, Maginot Ngangyo y a las doctoras Nydia Vásquez y Anaid Silva, por motivarme y ayudarme a mejorar en muchos sentidos, incluida la forma de trabajar. A mis compañeros de laboratorio, estudiantes, ingenieros y maestros Arely Ruiz, Elizabeth Garza, Francisco Mendoza, Jesús Lara, Kenel Merzilus y también los chicos y chicas de servicio social, por haber compartido tantas cosas juntos. Mis queridas amistades Antonio Vásquez, Jorge Martínez, Luis Ibarra y Erick Velázquez, grandes personas y grandes investigadores. Decirles que gracias por haberme acompañado durante esta aventura y que ustedes tienen todo mi aprecio. Doy gracias a la UANL y a la SECIHTI por permitirme cursar este posgrado; a la Facultad de Agronomía y al laboratorio de remediación ambiental por abrirme las puertas por segunda vez tras la obtención de mi grado de Ingeniero en Biotecnología; a CIATEJ Noreste por acogerme en sus instalaciones, haberme permitido trabajar, tratarme muy bien y también por haber conocido a muchos investigadores grandiosos. Por último, a INTERNATIONAL por habernos proporcionado la materia prima para poder trabajar en esta investigación.

## DEDICATORIA

A mí, ya que gracias a Dios pude iniciar y terminar esta etapa inolvidable en mi vida, en donde no solo crecí en el ámbito profesional, sino también en el personal. Fueron dos años de mucho aprendizaje, trabajo y todo tipo de emociones, de los cuales me siento realmente satisfecho y feliz.

A mis padres, Lázaro Altamirano y Silvia Salcido, por haberme dado todo lo que estuvo en sus manos y más. Ellos siempre fueron mis dos pilares ante la vida y de corazón les digo que los amo y que muchas gracias por todo.

A mi hermano Isaac Altamirano, por ser ejemplo de cómo ser una persona muy valiente en su trabajo.

A mi abuelita Olga Martínez, por siempre preguntar sobre cómo me encuentro y por su apoyo cuando me las llegué a ver difíciles, económicamente hablando.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

**APROBACIÓN DE TESIS……i**

**LUGAR DE INVESTIGACIÓN……iii**

**AGRADECIMIENTOS……iv**

**DEDICATORIA……v**

**LISTA DE ABREVIATURAS……x**

**LISTA DE CUADROS……xii**

**LISTA DE FIGURAS……xiv**

**RESUMEN……xix**

**ABSTRACT……xx**

**1. INTRODUCCIÓN……1**

**2. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO……3**

2.1 Tratamiento de Aguas Residuales……3

2.2 Relevancia de *Arthrospira platensis* y Condiciones de Cultivo……3

2.3 Fotobiorreactores y Remoción de Nutrientes……5

2.3.1 Parámetros Fisicoquímicos de Operación en Cultivos Microalgales……6

2.4 Cosecha y Valorización de Biomasa Microalgal……7

2.5 Fundamentos de la Digestión Anaerobia……9

2.5.1 Limitaciones de Lodos y Ventajas de la Codigestión……9

2.6 Solubilización e Inhibiciones del Proceso……10

2.7 Modelos Cinéticos y Análisis del Biogás……10

2.8 Valorización de Lodos y Residuos Alimentarios……10

2.9 Enfoque de la Investigación……11

**3. JUSTIFICACIÓN……13**

**4. HIPÓTESIS……15**

**5. OBJETIVOS……16**

5.1 Objetivo General……16
5.1.1 Objetivos Específicos……16
**6. MATERIALES Y MÉTODOS……...17**
6.1 Localización del Estudio…..…….18
6.2 Materia Prima de la Fase I…….18
6.3 Microorganismo……..18
6.4 Fase I: Cianobacteria *A. platensis* como Tratamiento en Efluentes Residuales y Producción de Biocarbón…..19
6.4.1 Diseño Experimental de la Fase I……..……...19
6.4.2 Condiciones Óptimas de Crecimiento……..……20
6.4.3 Equipos e Insumos…….……...26
6.5 Análisis Fisicoquímicos y Bioquímicos en el Cultivo de *A. platensis*…..…26
6.5.1 Análisis Fisicoquímicos del Medio y Crecimiento Celular……...26
6.5.1.1 Crecimiento Celular…….……26
6.5.1.2 Oxígeno Disuelto……..…...27
6.5.1.3 pH, Temperatura, Potencial Óxido Reducción, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Salinidad…….……..27
6.5.1.4 Demanda Química de Oxígeno……..27
6.5.1.5 Amonio…….……..…28
6.5.1.6 Ortofosfatos……..……28
6.5.2 Análisis Bioquímicos de la Biomasa…….……..28
6.5.2.1 Lípidos…….……...…28
6.5.2.2 Ficocianina……..……..….29
6.5.3 Análisis Estadístico…….……..……..30
6.6 Efluentes Residuales…….……..……..30
6.6.1 Pruebas Preliminares……..……...30
6.6.2 Tratamientos Experimentales…….……..…….33
6.6.3 Sobrante Experimental de la Fase I…….……..…...34

6.6.3.1 Biocarbón……..……..35
6.7 Fase II: Microorganismos Anaerobios para Digestión de Lodos y Alimentos Residuales…….39
6.7.1 Materia Prima de la Fase II…….……..…..39
6.7.2 Caracterización Inicial……..…..41
6.7.2.1 pH, Sólidos Totales y Volátiles, DQO Total y Soluble, Nitrógeno Total y Fósforo Total……..……41
6.7.3 Diseño Experimental de la Fase II…….…..41
6.7.4 Medición de la Producción de Biogás (Metano)……..…44
6.7.5 Caracterización final……..……44
6.7.6 Modelo Matemático de Gompertz…….……..…..46
6.7.7 Cálculo del Porcentaje de Remoción…….……..….47
6.7.8 Estimación del Rendimiento de Metano…….……..……48
6.7.9 Sobrante Experimental de la Fase II…….……..…..50
**7. RESULTADOS……51**
7.1 Materia Prima de la Fase I…….……..…..52
7.2 Análisis Fisicoquímicos en el Cultivo de *A. platensis*……...……..52
7.2.1 Crecimiento Celular……..……..52
7.2.2 Oxígeno Disuelto…….……..…..60
7.2.3 pH, Temperatura, Potencial Óxido Reducción, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Salinidad…….……61
7.2.4 Demanda Química de Oxígeno…….……..……..66
7.2.5 Amonio……...……...67
7.2.6 Ortofosfatos……...……...68
7.3 Análisis Bioquímicos de Biomasa de *A. platensis*…….……....69
7.3.1 Lípidos…….……..……69
7.3.2 Ficocianina…….……..……70
7.4 Biocarbón…….……...……73

7.5 Materia Prima de la Fase II……75
7.6 Medición de la Producción de Biogás (Metano)……75
7.7 Modelo Matemático de Gompertz……79
7.8 Cálculo del Porcentaje de Remoción……81
7.9 Estimación del Rendimiento de Metano……82
**8. DISCUSIÓN……87**
8.1 Materia Prima de la Fase I……87
8.2 Análisis Fisicoquímicos en el Cultivo de *A. platensis*……88
8.2.1 Crecimiento Celular……89
8.2.2 Oxígeno Disuelto……91
8.2.3 pH, Temperatura, Potencial Óxido Reducción, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Salinidad……93
8.2.4 Demanda Química de Oxígeno……96
8.2.5 Amonio……97
8.2.6 Ortofosfatos……99
8.3 Análisis Bioquímicos de Biomasa de *A. platensis*……102
8.3.1 Lípidos……102
8.3.2 Ficocianina……103
8.4 Biocarbón……108
8.5 Medición de la Producción de Biogás (Metano)……110
8.6 Modelo Matemático de Gompertz……112
8.6.1 Balance de Carbono y Análisis Integral del Sistema……115
8.7 Cálculo del Porcentaje de Remoción……116
8.8 Estimación del Rendimiento de Metano……117
**9. CONCLUSIONES……122**
**10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS……125**
**11. ANEXOS……131**

## LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---|---|
| ***A.p*** | *Arthrospira platensis* |
| **AP** | Agua purificada |
| **NJ** | Nutrientes Jourdan |
| **PVC** | Policloruro de vinilo |
| **LED** | Diodo emisor de luz |
| **vvm** | Volumen de gas por volumen de líquido por minuto |
| **S/N** | Relación señal/ruido |
| **Rank** | Orden de importancia de los factores |
| **AR** | Agua residual |
| **AR-IC** | Agua residual Irrigación clorada |
| **AR-C** | Agua residual Cruda |
| **AR-I** | Agua residual Industrial |
| **AR-U** | Agua residual Ultrafiltración |
| **AR-O** | Agua residual Osmótica |
| **O** | Rechazo de Ósmosis |
| **pH** | Potencial de hidrógeno |
| **ST** | Sólidos totales |
| **DBO** | Demanda bioquímica de oxígeno |
| **DQO** | Demanda química de oxígeno total |
| **Turb** | Turbidez |
| **NTU** | Unidades nefelométricas de turbidez |
| **Abs** | Absorbancia |
| **CC** | Concentración celular |
| **Temp** | Temperatura |
| **OD** | Oxígeno disuelto |
| **ORP** | Potencial de Óxido-Reducción |
| **mv** | Milivoltios |
| **EC** | Conductividad eléctrica |

| | |
|---|---|
| **TDS** | Sólidos totales disueltos |
| **SALT** | Salinidad |
| **$N–NH_4^+$** | Amonio |
| **$P–PO_4^{3-}$** | Ortofosfatos |
| **Lip** | Lípidos |
| **$W_L$** | Diferencia de peso |
| **$W_A$** | Peso de muestra |
| **PC** | Ficocianina |
| **mi** | Masa inicial |
| **mf** | Masa final |
| **R** | Residuo |
| **MR** | Mezcla residuos |
| **LA** | Lodo anaerobio |
| **$CH_4$** | Metano |
| **ADM1** | Modelo de digestión anaerobia No. 1 |
| **C/N** | Relación carbono/nitrógeno |
| **Ci** | Concentración inicial |
| **Cf** | Concentración final |
| **Sv** | Sólidos volátiles |
| **$DQO_s$** | Demanda química de oxígeno soluble |
| **NT** | Nitrógeno total |
| **PT** | Fósforo total |
| **exp()** | Función exponencial |
| **$R^2$** | Coeficiente de determinación |
| **RMSE** | Error cuadrático medio |
| **MJ** | Megajulios |
| **Hmax** | Producción máxima |
| **λ** | Fase latencia/lag |
| **Rmax** | Velocidad máxima |
| **ACV** | Análisis del ciclo de vida |

## LISTA DE CUADROS


| Número | Título del Cuadro | Página |
|---|---|---|
| 1 | Microalgas y fotobiorreactores aplicados al tratamiento de aguas residuales y valorización de biomasa | 8 |
| 2 | Digestión anaerobia y codigestión de residuos orgánicos para la producción de biogás y valorización de lodos | 11 |
| 3 | Diseño experimental Taguchi para sistema microalgal | 20 |
| 4 | Cantidades específicas correspondientes a la combinación de residuos (R/MR) y lodo anaerobio (LA) | 43 |
| 5 | Análisis de lodo anaerobio (LA) para determinación de la diferencia resultante del agregado del mismo en residuos de controles y tratamientos poscodigestión anaerobia | 45 |
| 6 | Producción máxima alcanzada de metano ($CH_4$) en función de las cantidades y proporciones específicas establecidas en las mezclas de muestras de estudio (R) y lodo anaerobio (LA) | 46 |
| 7 | Caracterización de los diferentes tipos de efluentes residuales seleccionados provenientes de INTERNATIONAL | 52 |
| 8 | Concentración celular del crecimiento experimental con respecto a los nueve controles de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (g/L) | 53 |
| 9 | Concentración celular del crecimiento experimental con respecto a los nueve controles de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (cél/mL) | 53 |
| 10 | Tabla de respuesta para la relación señal/ruido (S/N) del diseño experimental Taguchi | 55 |
| 11 | Análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir del tratamiento de las muestras experimentales con cianobacterias *A. platensis* | 72 |
| 12 | Análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir de la biomasa microalgal postratada con cianobacterias *A. platensis* | 72 |
| 13 | Resultados fisicoquímicos y operativos del biocarbón obtenido a partir de la biomasa de *Arthrospira platensis* (AR-O-2NJ) | 74 |
| 14 | Resumen de resultados clave del biocarbón obtenido a partir de la biomasa microalgal postratada con cianobacterias *A. platensis* | 75 |
| 15 | Valores de pH previos y posteriores a la codigestión anaerobia de las muestras residuales de estudio (R) | 80 |

16 Análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir del proceso de digestión de controles experimentales con microorganismos anaerobios 83
17 Análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir del proceso de codigestión de tratamientos experimentales con microorganismos anaerobios 84

## LISTA DE FIGURAS


| Número | Título de la Figura | Página |
|---|---|---|
| 1 | Micrografías ópticas de *Arthrospira maxima* que muestran una mayor densidad celular con menor tamaño individual (≈ 1–2 µm), observadas a 100× (izquierda) y 20× (derecha) | 5 |
| 2 | Micrografías ópticas de *Arthrospira platensis*, caracterizadas por un menor número de células observadas, pero con mayor tamaño celular, de aproximadamente 5–6 µm. Aumentos de 100× (izquierda) y 20× (derecha) | 5 |
| 3 | Micrografía óptica de lodo anaerobio con biomasa involucrada en la digestión anaerobia. Barra de escala: 5 µm | 10 |
| 4 | Diagrama de bloques general de la metodología experimental y descripción de las dos fases de estudio | 17 |
| 5 | Recolección de cinco diferentes tipos de efluentes residuales provenientes de la industria automotriz. a) efluente residual de Irrigación clorada b) efluente residual de Irrigación sin cloro/Cruda c) efluente residual Industrial/Coagulación-Floculación d) efluente residual de Rechazo de Ultrafiltración e) efluente residual de Rechazo de Ósmosis | 18 |
| 6 | Cultivos estériles de cianobacteria *Arthrospira platensis* en medio Jourdan purificado | 19 |
| 7 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP1-6NJ). a) Inicio b) Final | 21 |
| 8 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP2-6NJ). a) Inicio b) Final | 21 |
| 9 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP3-6NJ). a) Inicio b) Final | 22 |
| 10 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP4-6NJ). a) Inicio b) Final | 22 |
| 11 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP5-6NJ). a) Inicio b) Final | 23 |

| | | |
|---|---|---|
| 12 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP6-6NJ). a) Inicio b) Final | 23 |
| 13 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP7-6NJ). a) Inicio b) Final | 24 |
| 14 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP8-6NJ). a) Inicio b) Final | 24 |
| 15 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP9-6NJ). a) Inicio b) Final | 25 |
| 16 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP-6NJ). a) Inicio b) Final | 25 |
| 17 | Análisis de biomasa microalgal de tratamientos funcionales mediante la determinación de lípidos y ficocianina | 30 |
| 18 | Prueba preliminar de *Arthrospira platensis* en agua residual de Irrigación sin cloro/Cruda. a) Sin nutrientes Jourdan b) Con 6/6 nutrientes Jourdan | 31 |
| 19 | Prueba preliminar de *Arthrospira platensis* en agua residual Industrial/Coagulación-Floculación. a) Sin nutrientes Jourdan b) Con 6/6 nutrientes Jourdan | 31 |
| 20 | Prueba preliminar de *Arthrospira platensis* en agua residual de Rechazo de Ultrafiltración. a) Sin nutrientes Jourdan b) Con 6/6 nutrientes Jourdan | 32 |
| 21 | Prueba preliminar de *Arthrospira platensis* en agua residual de Rechazo de Ósmosis. a) Sin nutrientes Jourdan b) Con 1/6 nutrientes Jourdan c) Con 2/6 nutrientes Jourdan d) Con 6/6 nutrientes Jourdan | 32 |
| 22 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* sin nutrientes Jourdan en agua residual de Rechazo de Ósmosis (AR-O). a) Inicio b) Final | 33 |
| 23 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 2/6 nutrientes Jourdan en agua residual de Rechazo de Ósmosis (AR-O-2NJ). a) Inicio b) Final | 33 |
| 24 | Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua residual de Rechazo de Ósmosis (AR-O-6NJ). a) Inicio b) Final | 34 |
| 25 | Cosechado y triturado de biomasa de *Arthrospira platensis* postratamiento microalgal | 34 |
| 26 | Liofilizado y almacenado de muestras de biomasa de *Arthrospira platensis* postratamiento microalgal | 35 |

| | | |
|---|---|---|
| 27 | Sobrante experimental de biomasa microalgal (AR-O-2NJ) postratada como sustrato para generación de biocarbón mediante pirólisis | 39 |
| 28 | Mezcla de lodo residual de filtro prensa/Torta y efluente residual de irrigación sin cloro/Crudo (Residuo n.º 1) | 40 |
| 29 | Triturado de residuos alimentarios de melón, manzana y plátano en agua de la llave mediante licuadora industrial (n.º 2) | 40 |
| 30 | Lodos activados o lodos anaerobios (LA) contienen bacterias capaces de degradar contaminantes y generar biogás | 42 |
| 31 | Experimentos realizados por triplicado. a) Digestión anaerobia (controles) b) Codigestión anaerobia (tratamientos) | 42 |
| 32 | Mezcla de los residuos n.º 1 y n.º 2 a tres proporciones distintas | 43 |
| 33 | Sistema de probeta invertida para medición de la producción de biogás (metano) | 44 |
| 34 | Resultados de las condiciones óptimas Taguchi con respecto a los nueve controles de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada. a) Crecimiento experimental (g/L) b) Crecimiento experimental (cél/mL) | 54 |
| 35 | Concentración celular del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (g/L) | 58 |
| 36 | Concentración celular del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (cél/mL) | 59 |
| 37 | Resultados por diferencia de medias Tukey con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis | 60 |
| 38 | Oxígeno disuelto/OD del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mg/L) | 61 |
| 39 | pH del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis | 62 |

| | | |
|---|---|---|
| 40 | Temperatura del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (°C) | 63 |
| 41 | Potencial óxido reducción/ORP del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mv) | 64 |
| 42 | Conductividad eléctrica/EC del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (us) | 65 |
| 43 | Sólidos totales disueltos/TDS del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (ppm) | 65 |
| 44 | Salinidad/SALT del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (ppm) | 66 |
| 45 | Concentración de DQO con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mg $O_2$/L) | 67 |
| 46 | Concentración de Amonio con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mg/L) | 68 |
| 47 | Concentración de Ortofosfatos con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mg/L) | 69 |
| 48 | Concentración de Lípidos con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (%) | 70 |
| 49 | Concentración de Ficocianina con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis | 71 |
| 50 | Obtención de biocarbón a partir de *A. platensis*. a) Biocarbón de Espirulina comercial b) Biocarbón de biomasa microalgal postratada (AR-O-2NJ) | 73 |

| | | |
|---|---|---|
| 51 | Producción acumulada de metano (mL/h) del control 100:0, correspondiente al residuo n.º 1 (lodos) | 77 |
| 52 | Producción acumulada de metano (mL/h) del control 0:100, correspondiente al residuo n.º 2 (alimentos) | 78 |
| 53 | Producción acumulada de metano (mL/h) del tratamiento 25:75, correspondiente a residuos n.º 1 y n.º 2 (mezcla) | 78 |
| 54 | Producción acumulada de metano (mL/h) del tratamiento 50:50, correspondiente a residuos n.º 1 y n.º 2 (mezcla) | 79 |
| 55 | Producción acumulada de metano (mL/h) del tratamiento 75:25, correspondiente a residuos n.º 1 y n.º 2 (mezcla) | 79 |
| 56 | Comportamiento de los parámetros Hmax (L), λ (días) y Rmax (L/día) del modelo matemático de Gompertz en controles (R1 100:0 y R2 0:100) y tratamientos (MR 25:75, MR 50:50 y MR 75:25), bajo diferentes porcentajes de LA inoculado (30 %, 20 % y 10 %) | 80 |
| 57 | Índice de remoción de Sv, $DQO_s$, NT y PT (%) en controles (R1 100:0 y R2 0:100) y tratamientos (MR 25:75, MR 50:50 y MR 75:25), bajo diferentes porcentajes de LA inoculado (30 %, 20 % y 10 %) | 81 |
| 58 | Rendimiento de metano como producción por remoción de sólidos volátiles (mL $CH_4$/g Sv), obtenido en controles (R1 100:0 y R2 0:100) y tratamientos (MR 25:75, MR 50:50 y MR 75:25), bajo diferentes porcentajes de LA inoculado (30 %, 20 % y 10 %) | 82 |
| 59 | Rendimiento de metano como producción por remoción de DQO soluble (mL $CH_4$/g $DQO_s$), obtenido en controles (R1 100:0 y R2 0:100) y tratamientos (MR 25:75, MR 50:50 y MR 75:25), bajo diferentes porcentajes de LA inoculado (30 %, 20 % y 10 %) | 83 |
| 60 | Identificación de cuatro diferentes tipos de lodos residuales provenientes de la industria automotriz. a) lodo de Saco b) lodo de Pintado c) lodo vaciado Pre-reactor d) lodo negro E-Coat | 132 |

## RESUMEN

La presente investigación evaluó un esquema integral de valorización de residuos industriales generados por la empresa INTERNATIONAL, mediante la integración de tres procesos biotecnológicos acoplados: cultivo microalgal, valorización termoquímica de biomasa residual y codigestión anaerobia.

En la Fase I, se optimizó el crecimiento de *Arthrospira platensis* en efluentes industriales mediante un diseño experimental Taguchi, evaluando concentración celular inicial, aireación, intensidad luminosa e inoculación. El tratamiento AR-O-6NJ (Rechazo de Ósmosis suplementado con seis nutrientes del medio Jourdan) presentó un crecimiento celular 35.8 % superior al control en agua purificada y 28.66 % mayor que el tratamiento con dos nutrientes. Se observaron reducciones en DQO, amonio y ortofosfatos, confirmando remoción biológica de carga orgánica y nutrientes. La empresa genera aproximadamente 7,000 L/día de Rechazo de Ósmosis y 15,000 L/día de Rechazo de Ultrafiltración, lo que evidencia el potencial de escalamiento del sistema microalgal para captura de $CO_2$, recuperación de agua y producción de biomasa, misma sometida a pirólisis para obtención de biocarbón, demostrando viabilidad técnica de valorización termoquímica. El material obtenido presentó características homogéneas y potencial uso como enmienda para composta o material adsorbente. Además, el proceso generó una fracción líquida rica en nutrientes susceptible de emplearse como fertilizante.

En la Fase II, se evaluó la digestión anaerobia y codigestión de lodo residual de Filtro prensa (6.17 toneladas generadas entre enero y mayo de 2025) y residuos alimentarios (1 tonelada diaria), utilizando lodo anaerobio cervecero como inóculo. Los ensayos (21 días, por triplicado) demostraron que el lodo industrial presentó bajo potencial metanogénico individual, mientras que las mezclas 50:50 y 75:25 (residuo alimentario:lodo) mostraron mayor estabilidad y producción acumulada de metano, con fases lag reducidas y valores cinéticos superiores según el modelo de Gompertz (mayores Hmax y Rmax). La codigestión mejoró la remoción de DQO soluble y sólidos volátiles, confirmando que la complementariedad de sustratos favorece la eficiencia del proceso. El metano generado puede transformarse en energía térmica o eléctrica; su conversión energética permite expresar el rendimiento en MJ.

En conjunto, el sistema integrado permite: (1) remoción de materia orgánica y nutrientes en efluentes industriales, (2) producción de biomasa microalgal con potencial de captura de $CO_2$, (3) obtención de biocarbón y subproductos valorizables y (4) generación de biogás como fuente de energía renovable. Los resultados demuestran que la articulación de procesos microalgales, anaerobios y termoquímicos constituye una alternativa técnica viable para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos industriales del sector automotriz, con posible potencial de escalamiento bajo un enfoque de economía circular y de recuperación energética.

## ABSTRACT

This research evaluated an integrated industrial waste valorization scheme generated by the company INTERNATIONAL through the integration of three coupled biotechnological processes: microalgal cultivation, thermochemical valorization of residual biomass, and anaerobic co-digestion.

In Phase I, the growth of *Arthrospira platensis* in industrial effluents was optimized using a Taguchi experimental design, evaluating initial cell concentration, aeration, light intensity, and inoculation. The AR-O-6NJ treatment (reverse osmosis reject supplemented with six nutrients from Jourdan medium) showed 35.8% higher cell growth than the purified water control and 28.66% greater growth than the treatment with two nutrients. Reductions in COD, ammonium, and orthophosphates were observed, confirming the biological removal of organic load and nutrients. The company generates approximately 7,000 L/day of reverse osmosis reject and 15,000 L/day of ultrafiltration reject, which highlights the scaling-up potential of the microalgal system for $CO_2$ capture, water recovery, and biomass production, the latter being subjected to pyrolysis for biochar production, demonstrating the technical feasibility of thermochemical valorization. The obtained material exhibited homogeneous characteristics and potential use as a compost amendment or adsorbent material. In addition, the process generated a nutrient-rich liquid fraction with potential application as fertilizer.

In Phase II, anaerobic digestion and co-digestion of filter press residual sludge (6.17 tons generated between January and May 2025) and food waste (1 ton per day) were evaluated using brewery anaerobic sludge as inoculum. The assays (21 days, in triplicate) demonstrated that the industrial sludge exhibited low individual methanogenic potential, whereas the 50:50 and 75:25 mixtures (food waste:sludge) showed greater stability and cumulative methane production, with reduced lag phases and superior kinetic values according to the Gompertz model (higher Hmax and Rmax). Co-digestion improved the removal of soluble COD and volatile solids, confirming that substrate complementarity enhances process efficiency. The generated methane can be transformed into thermal or electrical energy, and its energy conversion allows the yield to be expressed in MJ.

Overall, the integrated system enables: (1) removal of organic matter and nutrients from industrial effluents, (2) production of microalgal biomass with $CO_2$ capture potential, (3) production of biochar and valuable by-products, and (4) generation of biogas as a renewable energy source. The results demonstrate that the integration of microalgal, anaerobic, and thermochemical processes constitutes a technically viable alternative for the treatment and valorization of industrial waste from the automotive sector, with potential for scaling up under a circular economy and energy recovery approach.

# 1. INTRODUCCIÓN

La gestión de efluentes industriales y lodos residuales representa un desafío ambiental, operativo y energético, ya que en sistemas convencionales una fracción importante de la materia orgánica y nutrientes no se recupera como recurso, sino que permanece en corrientes residuales con bajo aprovechamiento. Esta limitación reduce la sostenibilidad técnica de los procesos y abre la posibilidad de integrar esquemas de valorización bajo principios de economía circular.

En este contexto, los biosistemas constituyen plataformas biotecnológicas capaces de integrar componentes bióticos y abióticos para transformar materia y energía dentro de sistemas controlados, favoreciendo la recuperación de carbono, nitrógeno y fósforo en productos de valor agregado (Molina y Rojas, 2015). Las aguas residuales industriales, cuando no son tratadas adecuadamente, representan un riesgo sanitario y una pérdida de recursos potencialmente aprovechables (Candela, 2015). Por ello, el uso de microalgas y cianobacterias en tratamientos terciarios ha cobrado relevancia por su capacidad para asimilar nutrientes y reducir la carga orgánica. En particular, *Spirulina platensis* ha mostrado remoción efectiva de nitrógeno y fósforo (Chavan & Mutnuri, 2018), mientras que consorcios microalga–bacteria y bacterias fototróficas púrpuras han demostrado alta eficiencia en fotobiorreactores (López et al., 2019). Dentro de este enfoque, *Arthrospira platensis* destaca por su adaptación a ambientes alcalinos, tolerancia ambiental y eficiencia fotosintética (Moreno, 2010; López, 2013), así como por su composición rica en proteínas y pigmentos (Bligh & Dyer, 1959; Bennett & Bogorad, 1973) y su potencial biotecnológico reciente (Ruiz García, 2024). Su desempeño depende de variables operativas como iluminación, temperatura, aireación y pH, así como de parámetros de seguimiento como oxígeno disuelto, potencial óxido-reducción, conductividad, salinidad, DQO, amonio y ortofosfatos, los cuales permiten evaluar la estabilidad metabólica, la remoción de nutrientes y la acumulación de

lípidos y pigmentos (Bennouna, 2022; Gonzáles, 2016; Tayebati et al., 2020; Vonshak, 1997; Richmond, 2004; Mahmoud et al., 2016; Markou & Georgakakis, 2011; Metcalf et al., 2014; Markou et al., 2014; Park et al., 2011; Hu et al., 2008; Converti et al., 2009; Eriksen, 2008; Chaiklahan et al., 2012; Ferreira et al., 2022; Rockhati et al., 2021; American Public Health Association, 2017; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022). Adicionalmente, la biomasa residual puede valorizarse mediante pirólisis para obtener biocarbón con aplicaciones adsorbentes, cuya funcionalidad puede incrementarse por activación química con $H_3PO_4$ (Chang et al., 2015; Almahbashi et al., 2021; Ioannidou & Zabaniotou, 2007; Liou, 2010; Jung et al., 2015; Saka et al., 2020; Ahmad et al., 2014). De manera complementaria, la digestión y codigestión anaerobia permiten recuperar energía contenida en lodos y residuos orgánicos mediante su conversión a biogás, optimizando la estabilidad del proceso y la producción específica de metano (Appels et al., 2008; Batstone et al., 2002; Atilano et al., 2020; Del Ángel et al., 2021; Carrillo et al., 2019; Julio et al., 2016; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003; Speece, 1996; Nava et al., 2021; López et al., 2024).

Por ello, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de dos biosistemas de aprovechamiento de efluentes y lodos residuales provenientes de la industria automotriz, mediante procesos microalgales y de codigestión anaerobia, en la remoción y transformación de la materia orgánica, la reducción de nutrientes, la generación de biocarbón y la producción de biogás, con la finalidad de proponer un esquema integral de valorización de residuos.

# 2. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

La revisión de literatura presentada en este capítulo tiene como finalidad contextualizar el desarrollo del presente trabajo de investigación, abordando los principales antecedentes científicos relacionados con el uso de sistemas microalgales y procesos anaerobios para el tratamiento y aprovechamiento de efluentes y lodos residuales. Asimismo, se describen los fundamentos teóricos de los parámetros fisicoquímicos relevantes y de los biosistemas empleados, con énfasis en la remoción de contaminantes y la obtención de bioproductos de valor agregado, de acuerdo con estudios previamente reportados (Vonshak, 1997; Markou & Georgakakis, 2011; Metcalf & Eddy, 2014; Ferreira et al., 2022).

## 2.1 Tratamiento de Aguas Residuales

El tratamiento de aguas residuales ha sido ampliamente desarrollado mediante técnicas de ingeniería que permiten la remoción de contaminantes y la recuperación de recursos, como se describe en Metcalf & Eddy (2014). En los últimos años, el uso de microalgas y cianobacterias ha cobrado mayor relevancia debido a su capacidad para depurar efluentes y generar compuestos de valor agregado. En este contexto, se han estudiado los consorcios microalga–bacteria y su aplicación en fotobiorreactores para la remoción simultánea de materia orgánica y nutrientes (López et al., 2019).

## 2.2 Relevancia de *Arthrospira platensis* y Condiciones de Cultivo

Entre las especies de mayor interés destaca la cianobacteria *Arthrospira platensis*, reconocida por su eficiencia en la eliminación de contaminantes y su potencial para la producción de bioproductos derivados de su biomasa, como indica Ruiz García (2024). El rendimiento de estos cultivos depende directamente de las condiciones fisicoquímicas y operativas del sistema, por lo que la optimización de los parámetros de cultivo resulta fundamental para maximizar la productividad microalgal.

La iluminación constituye uno de los factores más determinantes en el crecimiento de *Arthrospira*. Estudios como el de Tayebati et al. (2020) demuestran que la combinación de luz blanca, azul y roja favorece la actividad fotosintética, incrementando la generación de biomasa y la eficiencia energética del cultivo. De manera complementaria, Ferreira et al. (2022) establecieron parámetros óptimos de operación en sistemas controlados, incluyendo intensidades luminosas adecuadas, disponibilidad de nutrientes y condiciones alcalinas que favorecen el metabolismo celular.

La temperatura también desempeña un papel clave en la fisiología de *Arthrospira platensis*, al regular la actividad enzimática y la eficiencia fotosintética. Se ha reportado un rango óptimo de crecimiento entre 20 y 30 °C, dentro del cual se maximiza la tasa metabólica y la productividad del cultivo (Vonshak, 1997; Richmond, 2004). Temperaturas fuera de este intervalo pueden inducir estrés celular y disminuir la producción de biomasa.

El pH es otro parámetro crítico, ya que influye en la disponibilidad de nutrientes y en la estabilidad fisiológica del cultivo. Diversos autores reportan que *Arthrospira platensis* prospera en condiciones altamente alcalinas, con rangos óptimos entre pH 9.0 y 10.5; valores inferiores limitan el crecimiento, mientras que pH superiores a 11.5 pueden provocar daño celular (Mahmoud et al., 2016).

Adicionalmente, variables como la aireación, la concentración de $CO_2$ disuelto y la agitación del medio favorecen el intercambio gaseoso, previenen la sedimentación celular y mantienen la homogeneidad del cultivo, impactando de manera directa la productividad microalgal (Markou & Georgakakis, 2011). La evaluación integral de estos parámetros permite establecer estrategias de operación que optimicen el crecimiento y la valorización de la biomasa obtenida.

Existen dos especies similares, más no iguales, de *Arthrospira*, las cuales son: *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis*. Ambas especies tienen

características únicas, como diferencias en su tamaño celular y requerimientos de crecimiento. A continuación, en las Figuras 1 y 2 se muestran algunas imágenes e información alusiva a las mismas:

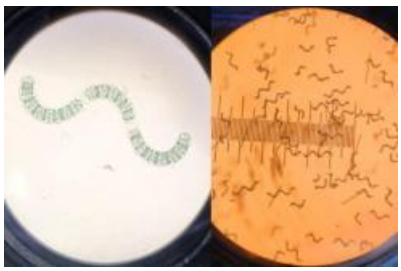

***Figura 1.*** Micrografías ópticas de *Arthrospira maxima* que muestran una mayor densidad celular con menor tamaño individual (≈ 1–2 µm), observadas a 100× (izquierda) y 20× (derecha).

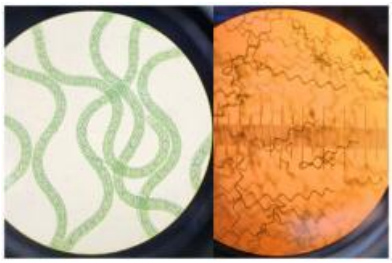

***Figura 2.*** Micrografías ópticas de *Arthrospira platensis*, caracterizadas por un menor número de células observadas, pero con mayor tamaño celular, de aproximadamente 5–6 µm. Aumentos de 100× (izquierda) y 20× (derecha).

### 2.3 Fotobiorreactores y Remoción de Nutrientes

Los fotobiorreactores representan una alternativa con ventajas significativas frente a otros sistemas, puesto que permiten un mayor control operacional y reducen el riesgo de contaminación, como señala Bennouna (2022). Gracias a estas características, se han logrado procesos de alta eficiencia en la remoción de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, mediante tratamientos terciarios basados en *Arthrospira platensis* (Chavan & Mutnuri, 2018).

Además, los fotobiorreactores permiten un control más preciso de variables como la intensidad lumínica, la temperatura, el pH y la aireación, lo que se traduce en mayores eficiencias de remoción de nutrientes y productividad de biomasa en comparación con sistemas abiertos (Bennouna, 2022). Bajo estas configuraciones controladas, se han documentado remociones significativas de nitrógeno y fósforo en tratamientos terciarios empleando *Arthrospira platensis* (Chavan & Mutnuri, 2018), lo que refuerza su aplicación en esquemas de biorremediación y recuperación de recursos.

### 2.3.1 Parámetros Fisicoquímicos de Operación en Cultivos Microalgales

El monitoreo de parámetros fisicoquímicos no solo permite evaluar el desempeño global de los sistemas microalgales, sino que proporciona información mecanística sobre los procesos de transferencia de masa, equilibrio redox y metabolismo celular que gobiernan la remoción de nutrientes. Variables como el oxígeno disuelto reflejan el balance dinámico entre la producción fotosintética de $O_2$ y su consumo respiratorio, constituyendo un indicador directo de la actividad metabólica del cultivo y de la eficiencia de conversión de energía lumínica en biomasa (Markou & Georgakakis, 2011).

El potencial óxido-reducción (ORP) está asociado con la disponibilidad de aceptores y donadores de electrones en el medio, influyendo en el entorno redox que condiciona rutas metabólicas tanto fotosintéticas como respiratorias. Variaciones en el ORP pueden indicar cambios en la actividad microbiana asociada o en la acumulación de compuestos intermedios, afectando la estabilidad bioquímica del sistema (Metcalf & Eddy, 2014). Desde una perspectiva ingenieril, este parámetro permite inferir posibles limitaciones en la transferencia electrónica y desequilibrios en el metabolismo celular.

Asimismo, la conductividad eléctrica (CE), los sólidos disueltos totales (TDS) y la salinidad representan indicadores de la concentración iónica del medio, la cual influye en los gradientes osmóticos y en los mecanismos de transporte de nutrientes a través de la membrana celular. Cambios significativos en estos parámetros pueden modificar la presión osmótica externa, afectando la difusión de especies químicas y la eficiencia de asimilación de nitrógeno y fósforo por parte de la biomasa (Vonshak, 1997; Markou et al., 2014). Desde el punto de vista de transferencia de masa, una mayor carga iónica puede alterar coeficientes de difusión y la disponibilidad efectiva de nutrientes en el entorno inmediato de las células.

La medición de nutrientes como amonio y ortofosfatos, junto con indicadores de materia orgánica como la DQO, permite establecer balances de masa parciales y determinar la eficiencia de remoción del sistema, vinculando la disminución de concentraciones en el medio con su incorporación en biomasa o su transformación metabólica (Park et al., 2011; Ferreira et al., 2022). De esta manera, el análisis integrado de estos parámetros posibilita comprender la relación entre condiciones operativas, dinámica metabólica y desempeño global del proceso microalgal.

### 2.4 Cosecha y Valorización de Biomasa Microalgal

Uno de los desafíos más relevantes en la producción microalgal es la cosecha de biomasa, por lo que se han evaluado métodos que reduzcan costos y tiempo. En este sentido, Rockhati et al. (2021) propone el uso de quitosano como bioflоculante natural, demostrando su eficacia para la recuperación de biomasa sin generar toxicidad. Además, se ha explorado la valorización del residuo microalgal tras el tratamiento de aguas residuales, donde trabajos como el de Chang et al. (2015), sugieren su potencial para la generación de biocarbón, ampliando las posibilidades de aprovechamiento de los subproductos de estos sistemas. Más de los datos referentes a investigaciones con microalgas, se pueden apreciar en el Cuadro 1.

***Cuadro 1.*** Microalgas y fotobiorreactores aplicados al tratamiento de aguas residuales y valorización de biomasa.

| Objeto de estudio | Contribución principal | Resultados | Referencia |
|---|---|---|---|
| Tratamiento convencional de aguas residuales | Fundamentos de ingeniería para el tratamiento y la remoción de contaminantes | Eficiencias típicas en tratamiento biológico**:** 85–95% DBO**,** 70–90% DQO y 80–95% SST. | Metcalf & Eddy, 2014. |
| Consorcios microalga–bacteria | Mejora en la remoción de materia orgánica y nutrientes | Eliminación de nutrientes: N total 60–80%**,** P total 55–75%; biomasa generada 0.4–0.6 g $L^{-1}$ $día^{-1}$. | López et al., 2019. |
| *Arthrospira* como organismo modelo | Aplicación en la depuración de contaminantes y producción de bioproductos | Remoción de nitrógeno 40–65%; producción de biomasa 0.3–0.5 g $L^{-1}$ $día^{-1}$; contenido proteico >55%. | Ruiz García, 2024. |
| *Arthrospira* con distintas iluminaciones | Efecto de la luz blanca, azul y roja en el crecimiento microalgal | Incremento del 20–35% en crecimiento bajo luz azul; productividad de 0.45 g $L^{-1}$ $día^{-1}$. | Tayebati et al., 2020. |
| *Arthrospira* en cultivo controlado | Determinación de condiciones óptimas de cultivo | Condiciones óptimas: pH 9–10**,** 30–35 °C**,** 100–150 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$; productividades de 0.4–0.6 g $L^{-1}$ $día^{-1}$. | Ferreira et al., 2022. |
| Fotobiorreactores vs. sistemas abiertos | Ventajas operativas de los fotobiorreactores | Reducción de contaminación cruzada hasta 80%; aumento de productividad entre 25–40%. | Bennouna, 2022. |
| *Arthrospira* en tratamiento terciario | Remoción de nitrógeno y fósforo en tratamiento terciario | Remoción de nutrientes en efluentes secundarios: N 70–85%, P 60–80%. | Chavan & Mutnuri, 2018. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Biomasa floculada con quitosano | Biofloculación mediante quitosano | Eficiencia de separación 90–98%; tiempos de sedimentación reducidos de horas a minutos. | Rockhati et al., 2021. |
| Tratamiento convencional de aguas residuales | Potencial de generación de biocarbón por pirólisis lenta | Rendimiento de biocarbón 25–35%; carbono fijo >60%. | Chang et al., 2015. |

## 2.5 Fundamentos de la Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es una biotecnología ampliamente utilizada para el tratamiento de residuos orgánicos y lodos residuales debido a su capacidad para reducir contaminantes y generar biogás. Este proceso comprende cuatro etapas principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, descritas por Appels et al. (2008), mediante las cuales los compuestos orgánicos se transforman progresivamente hasta producir metano y dióxido de carbono. Su entendimiento ha sido reforzado por modelos bioquímicos como el ADM1, desarrollado por Batstone et al. (2002), que permiten predecir la dinámica del proceso y detectar fenómenos de inestabilidad, como la acumulación de ácidos volátiles.

### 2.5.1 Limitaciones de Lodos y Ventajas de la Codigestión

Los lodos residuales son uno de los sustratos más utilizados, aunque presentan baja biodegradabilidad y limitado potencial metanogénico cuando se tratan de manera individual, según las investigaciones de Julio et al. (2016). Esta limitación ha impulsado el uso de la codigestión anaerobia, estrategia que combina diferentes residuos para mejorar la disponibilidad de nutrientes, equilibrar la relación C/N y diluir compuestos tóxicos. Del Ángel et al. (2021) demostraron que la codigestión puede incrementar la producción de biohidrógeno, mientras que Nava et al. (2021) reportaron un aumento significativo en la generación de metano al combinar residuos como la pulpa de café con pretratamientos que favorecen la solubilización.

El proceso biológico conocido como “digestión anaerobia”, normalmente es llevado a cabo mediante la inoculación de microorganismos anaerobios en algún residuo que contenga microorganismos aerobios. A continuación, en la Figura 3 se puede apreciar una imagen e información alusiva a los mismos:

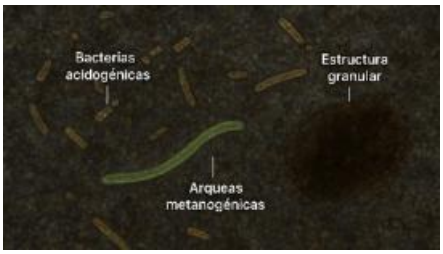


***Figura 3.*** Micrografía óptica de lodo anaerobio con biomasa involucrada en la digestión anaerobia. Barra de escala: 5 µm.

### 2.6 Solubilización e Inhibiciones del Proceso

La solubilización inicial de carbohidratos, proteínas y lípidos es determinante para el desempeño del sistema, ya que incrementa la fracción biodegradable y favorece la actividad microbiana, como reportan Batstone et al. (2002) y López et al. (2024). Sin embargo, la rápida conversión de carbohidratos puede generar reducciones en el pH y acumulación de ácidos volátiles, indicadores de inhibición (Speece, 1996).

### 2.7 Modelos Cinéticos y Análisis del Biogás

Para analizar la cinética de producción de biogás, diversos estudios emplean el modelo de Gompertz, herramienta útil para estimar la producción máxima, la velocidad de generación y la fase de adaptación microbiana, como se es mencionado en Atilano et al. (2020). Además, metodologías analíticas como el sistema de probeta invertida y la cromatografía de gases confirman que el metano es el componente predominante del biogás (Carrillo et al. 2019).

### 2.8 Valorización de Lodos y Residuos Alimentarios

La combinación de lodos industriales con residuos alimentarios ha demostrado aumentar la producción de metano y mejorar la remoción de contaminantes, como lo documentan Julio et al. (2016), Del Ángel et al. (2021) y Nava et al. (2021). Asimismo, estudios recientes plantean el aprovechamiento de los lodos digeridos para la producción de biocarbón con potencial agrícola bajo los estudios de Almahbashi et al. (2021). Esto refuerza la importancia de valorizar los subproductos generados.

### 2.9 Enfoque de la Investigación

En este marco, la presente investigación se fundamenta en estos avances y se orienta a evaluar la codigestión de lodos industriales y residuos alimentarios generados por la empresa INTERNATIONAL, con el objetivo de analizar su biodegradabilidad, la producción de metano y su viabilidad como alternativa sustentable para el manejo de residuos de la industria automotriz. Más de los datos referentes a investigaciones en lodos, se pueden apreciar en el Cuadro 2.

***Cuadro 2.*** Digestión anaerobia y codigestión de residuos orgánicos para la producción de biogás y valorización de lodos.

| Objeto de estudio | Contribución principal | Resultados | Referencia |
|---|---|---|---|
| Parámetros de digestión anaerobia | Parámetros clave de digestión y eficiencia de remoción | Reducción de DQO 70–85%; producción de metano 250–350 mL $CH_4$/g Sv. | Appels et al., 2008. |
| Modelo ADM1 | Simulación del proceso anaerobio | Predicción de acumulación de AGV >2000 mg $L^{-1}$ y descensos de pH <6.5, asociados a inhibición del proceso. | Batstone et al., 2002. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Lodos y residuos orgánicos | Metodologías de caracterización de los residuos | Contenido de sólidos volátiles 55–70%; relación C/N de 6–10, típica de lodos residuales. | Julio et al., 2016. |
| Residuos en digestión anaerobia | Gráficos de producción de biogás | Producción acumulada de biogás 300–500 mL/g Sv, dependiendo de la mezcla. | Del Ángel et al., 2021. |
| Codigestión con pulpa de café | Aumento en la producción de metano | Incremento de 20–45% en $CH_4$ respecto a la digestión individual; valores de hasta 380 mL $CH_4$/g Sv. | Nava et al., 2021. |
| Cinética con modelo de Gompertz | Uso del modelo de Gompertz | Parámetros cinéticos: Rm 20–30 mL $CH_4$/día, fase lag 1–3 días, P 300–450 mL. | López et al., 2024. |
| Análisis de metano | Cuantificación por probeta invertida y cromatografía | Composición del biogás: 55–70% $CH_4$, 30–45% $CO_2$, con trazas <1% de otros gases. | Carrillo et al., 2019. |
| Lodos digeridos | Producción de biocarbón | Rendimiento de biocarbón 30–45%; área superficial 200–350 m²/g. | Almahbashi et al., 2021. |

## 3. JUSTIFICACIÓN

El manejo de efluentes industriales y lodos residuales en la industria automotriz representa un desafío significativo debido a su elevada carga contaminante y al limitado aprovechamiento de los recursos contenidos en estas corrientes. Tradicionalmente, los sistemas de tratamiento se enfocan en la remoción de contaminantes sin considerar la recuperación de materia y energía, lo que reduce la eficiencia global de los procesos y limita su sostenibilidad. En este contexto, surge la necesidad de implementar estrategias integrales que permitan no solo el tratamiento, sino también la valorización de los residuos bajo un enfoque de economía circular.

En la Fase I, el uso de sistemas microalgales basados en la cianobacteria *Arthrospira platensis* se justifica por su capacidad para asimilar nutrientes y reducir la carga orgánica presente en efluentes industriales, contribuyendo a la remoción de contaminantes como nitrógeno, fósforo y materia orgánica. Además, estos sistemas permiten la captura de $CO_2$ y la generación de biomasa con potencial de aprovechamiento, rica en compuestos de valor agregado como lípidos y ficocianina. De esta manera, el tratamiento de aguas residuales se transforma en una oportunidad para la producción de biomasa útil, favoreciendo el cierre de ciclos de carbono y nutrientes. Sumado a eso, la valorización de la biomasa residual generada en los procesos previos mediante su conversión termoquímica a biocarbón responde a la necesidad de maximizar el aprovechamiento de los residuos. La pirólisis, especialmente cuando se combina con activación química, permite obtener un material carbonoso con propiedades potenciales para aplicaciones ambientales, como la adsorción de contaminantes. Este enfoque no solo contribuye a reducir la cantidad de residuos finales, sino que también genera un producto con valor agregado, ampliando las oportunidades de reutilización dentro del sistema. No obstante, el manejo de los residuos sólidos generados, particularmente los lodos industriales, continúa siendo una problemática relevante.

En la Fase II, la digestión anaerobia se plantea como una alternativa sostenible para la estabilización de estos residuos y la recuperación de energía en forma de biogás. Sin embargo, los lodos residuales presentan generalmente baja biodegradabilidad y limitada producción de metano cuando son tratados de manera individual. Ante esta limitación, la codigestión anaerobia con residuos alimentarios se justifica como una estrategia eficaz para mejorar el desempeño del proceso, al proporcionar un cosustrato de alta biodegradabilidad que favorece el equilibrio nutricional, la actividad microbiana y la cinética de degradación. Esta sinergia permite incrementar la producción de biogás, mejorar la remoción de contaminantes y optimizar la estabilidad del sistema, representando una solución técnica y económicamente viable.

En términos generales, la integración de sistemas microalgales, la conversión termoquímica y los procesos de codigestión anaerobia permiten abordar de manera integral el tratamiento y aprovechamiento de residuos industriales, promoviendo la recuperación de materia y energía. En el caso específico de la empresa INTERNATIONAL, la implementación de este tipo de estrategias representa una oportunidad para mejorar la eficiencia de sus procesos, reducir costos asociados al manejo de residuos y avanzar hacia un modelo de gestión más sostenible. Por ello, la presente investigación se justifica en la necesidad de desarrollar e integrar tecnologías que transformen residuos en recursos, contribuyendo al fortalecimiento de esquemas de economía circular en el sector industrial.

## 4. HIPÓTESIS

Se plantea que la aplicación de sistemas microalgales y de codigestión anaerobia, implementados para el tratamiento y aprovechamiento de efluentes, lodos residuales y residuos alimentarios provenientes de la empresa INTERNATIONAL, permitirá generar mejoras medibles en sus características fisicoquímicas, reflejadas en la remoción de materia orgánica, la reducción de nutrientes y la estabilización de sólidos, en cumplimiento con los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la NOM-004-SEMARNAT-2002, respectivamente.

Adicionalmente, se considera que la biomasa residual generada en el sistema microalgal podrá ser valorizada mediante un proceso de carbonización bajo atmósfera inerte para la obtención de biocarbón, constituyendo una alternativa de aprovechamiento del subproducto con potencial aplicación como material adsorbente.

Asimismo, se plantea que la codigestión anaerobia de lodos residuales con residuos alimentarios favorecerá la biodegradabilidad del sustrato y la conversión de la materia orgánica, incrementando la producción de biogás en comparación con sistemas sin cosustrato, debido al ajuste de la relación carbono/nitrógeno y a la sinergia metabólica del consorcio microbiano.

# 5. OBJETIVOS

## 5.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de dos biosistemas de aprovechamiento de efluentes y lodos residuales provenientes de la industria automotriz, mediante procesos microalgales y de codigestión anaerobia, en la remoción y transformación de la materia orgánica, la reducción de nutrientes, la generación de biocarbón y la producción de biogás, con la finalidad de proponer un esquema integral de valorización de residuos.

### 5.1.1 Objetivos Específicos

• Validar un sistema de tratamiento terciario a nivel laboratorio mediante el cultivo de la cianobacteria *Arthrospira platensis*, bajo condiciones óptimas de crecimiento, en un efluente secundario proveniente de la empresa INTERNATIONAL, con la finalidad de mejorar su calidad fisicoquímica, considerando parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, tales como DQO, amonio, ortofosfatos, sólidos y pH, y determinar su viabilidad como alternativa biológica para el pulimiento de efluentes industriales automotrices.

• Generar biocarbón a partir de la biomasa residual obtenida del sistema microalgal, mediante un proceso de carbonización bajo atmósfera inerte, como una estrategia de valorización de subproductos, con el propósito de integrar un esquema termoquímico que complemente el sistema y fortalezca su sostenibilidad ambiental y energética.

• Evaluar un sistema cerrado de codigestión anaerobia a nivel laboratorio, aplicado a lodo primario y residuos alimentarios provenientes de la empresa INTERNATIONAL, con la finalidad de remover materia orgánica y producir metano, considerando los parámetros establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002, tales como DQO, nitrógeno, fósforo, sólidos y pH, analizando el efecto de la codigestión sobre la estabilización del lodo y su respectivo potencial.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

La Figura 4, representa las partes que integraron esta investigación.

***Figura 4.*** Diagrama de bloques general de la metodología experimental y descripción de las dos fases de estudio.

Esta investigación está conformada por dos fases experimentales:

Fase I. Cianobacteria *Arthrospira platensis* como tratamiento en efluentes residuales y producción de biocarbón.

Fase II. Microorganismos anaerobios para digestión de lodos y alimentos residuales.

## 6.1 Localización del Estudio

La investigación fue realizada en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León y en el centro de investigación CIATEJ Noreste del Parque de Investigación e Innovación Tecnológica. La fase 1 (microalgas) en el Laboratorio de Remediación Ambiental y Análisis de Suelos, Plantas y Aguas, durante el período de enero de 2024 a mayo de 2025. La fase 2 (lodos) en el Laboratorio de Ambiental durante junio a noviembre de 2025.

## 6.2 Materia Prima de la Fase I

Para la fase 1, se identificaron y estudiaron cada uno de los diferentes tipos de efluentes residuales generados por la empresa INTERNATIONAL (Carretera Monterrey - Monclova No. 5000, General Escobedo, Nuevo León, C.P. 66050, México.), los cuales se muestran en la Figura 5.

***Figura 5.*** Recolección de cinco diferentes tipos de efluentes residuales provenientes de la industria automotriz. a) efluente residual de Irrigación clorada b) efluente residual de Irrigación sin cloro/Cruda c) efluente residual Industrial/Coagulación-Floculación d) efluente residual de Rechazo de Ultrafiltración e) efluente residual de Rechazo de Ósmosis.

Estos efluentes, fueron caracterizados, aceptados y descartados de manera cuantitativa, considerando los límites máximos de descarga de contaminantes, establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, analizando parámetros como pH, Sólidos, Demanda química de oxígeno y Turbidez.

## 6.3 Microorganismo

Se cultivó la cianobacteria *Arthrospira platensis* en matraces de vidrio de 250 mL bajo condiciones estériles, mediante autoclave (Mxmoonfree PRESSURE STEAM AUTOCLAVE), suministrándole luz, aireación y medio de cultivo Jourdan, preparado a partir de la mezcla de agua purificada y seis diferentes sales (nutrientes), las cuales fueron: bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) 5.88 g/L, fosfato monopotásico ($KH_2PO_4$) 0.165 g/L, nitrato de sodio ($NaNO_3$) 0.921 g/L, sulfato de magnesio heptahidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) 0.07 g/L, sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) 0.004 g/L y cloruro de sodio (NaCl) 2 g/L, e inóculo, lo anterior para promover su desarrollo.

En la Figura 6, se pueden observar tres cultivos funcionales de *A. platensis*. El crecimiento celular se evaluó mediante un espectrofotómetro UV/Vis (Evolution 201, Thermo Scientific, China).

***Figura 6.*** Cultivos estériles de cianobacteria *Arthrospira platensis* en medio Jourdan purificado.

### 6.4 Fase I: Cianobacteria *A. platensis* como Tratamiento en Efluentes Residuales y Producción de Biocarbón

Una vez obtenidos más de 20 litros de volumen de los cultivos de *A. platensis*, se trabajó en un rack experimental, el cual fue apto y fundamental para la búsqueda y optimización de las mejores condiciones de crecimiento de la cianobacteria.

#### 6.4.1 Diseño Experimental de la Fase I

A continuación, el Cuadro 3 representa los nueve controles experimentales basados en un diseño Taguchi, considerando cuatro factores principales: concentración celular de *A. platensis* (cél/mL), tiempo de inoculación (días), tasa de aireación (vvm) e intensidad luminosa (lux).

***Cuadro 3.*** Diseño experimental Taguchi para sistema microalgal.

| **Controles / Parámetros** | **Concentración (cél/mL)** | **Inoculación (días)** | **Aireación (vvm)** | **Luminosidad (lux)** |
|---|---|---|---|---|
| AP1-6NJ | 30,000 (-1) | 5 (-1) | 0.1 (-1) | 100 (-1) |
| AP2-6NJ | 30,000 (-1) | 8 (0) | 0.35 (0) | 200 (0) |
| AP3-6NJ | 30,000 (-1) | 11 (+1) | 0.6 (+1) | 300 (+1) |
| AP4-6NJ | 45,000 (0) | 5 (-1) | 0.35 (0) | 300 (+1) |
| AP5-6NJ | 45,000 (0) | 8 (0) | 0.6 (+1) | 100 (-1) |
| AP6-6NJ | 45,000 (0) | 11 (+1) | 0.1 (-1) | 200 (0) |
| AP7-6NJ | 70,000 (+1) | 5 (-1) | 0.6 (+1) | 200 (0) |
| AP8-6NJ | 70,000 (+1) | 8 (0) | 0.1 (-1) | 300 (+1) |
| AP9-6NJ | 70,000 (+1) | 11 (+1) | 0.35 (0) | 100 (-1) |

### 6.4.2 Condiciones Óptimas de Crecimiento

Para llevar a cabo los experimentos, se emplearon bolsas de 15 litros (ULINE POLY TUBING) como biorreactores, trabajados con cantidades específicas de medio de crecimiento Jourdan (agua purificada) e inóculo de cultivo de *Arthrospira platensis*, como se puede observar en las Figuras 7–15.

***Figura 7.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP1-6NJ). a) Inicio b) Final.

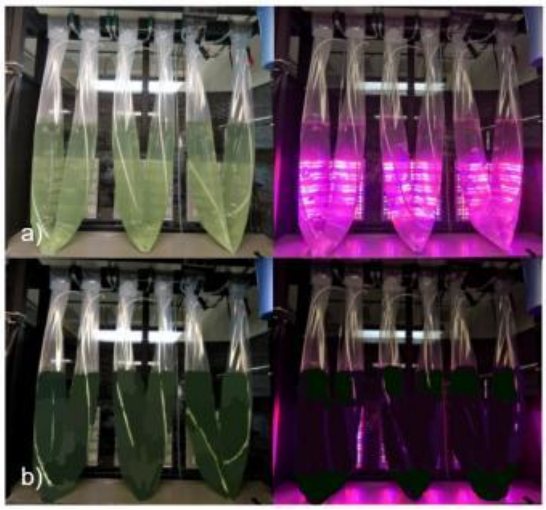


***Figura 8.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP2-6NJ). a) Inicio b) Final.

***Figura 9.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP3-6NJ). a) Inicio b) Final.

***Figura 10.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP4-6NJ). a) Inicio b) Final.

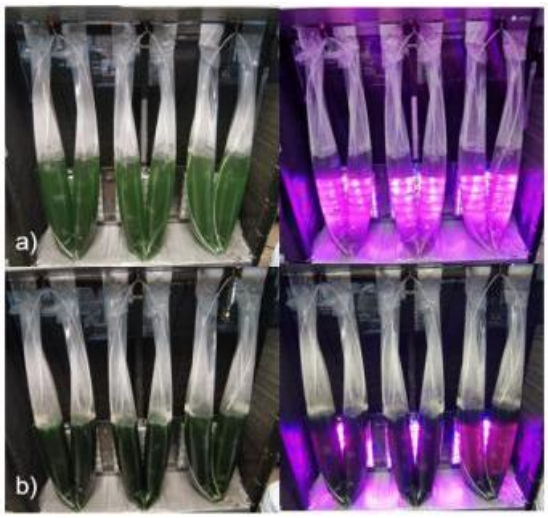


***Figura 11.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP5-6NJ). a) Inicio b) Final.

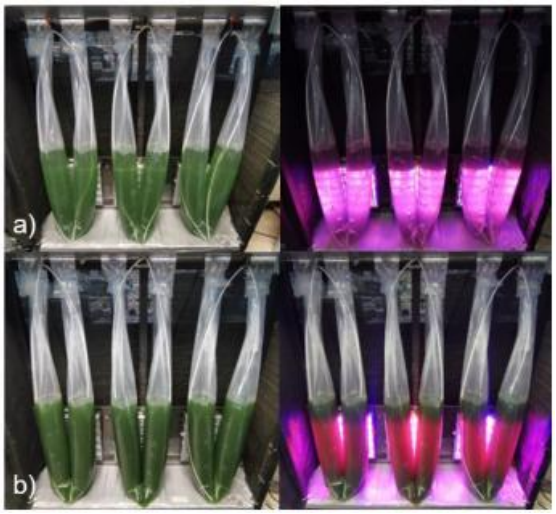


***Figura 12.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP6-6NJ). a) Inicio b) Final.

***Figura 13.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP7-6NJ). a) Inicio b) Final.

***Figura 14.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP8-6NJ). a) Inicio b) Final.

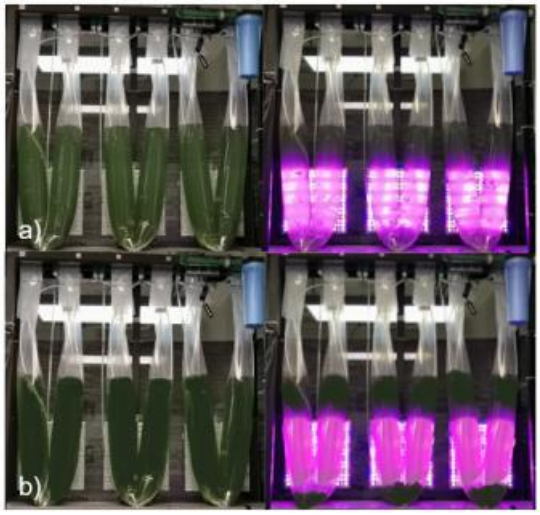


***Figura 15.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP9-6NJ). a) Inicio b) Final.

Adicionalmente, se realizó un cultivo a gran escala de *A. platensis* en medio Jourdan purificado, utilizando bolsas de 15 litros, también por triplicado (considerado como control experimental para futuros tratamientos). A este se le puede observar en la Figura 16.

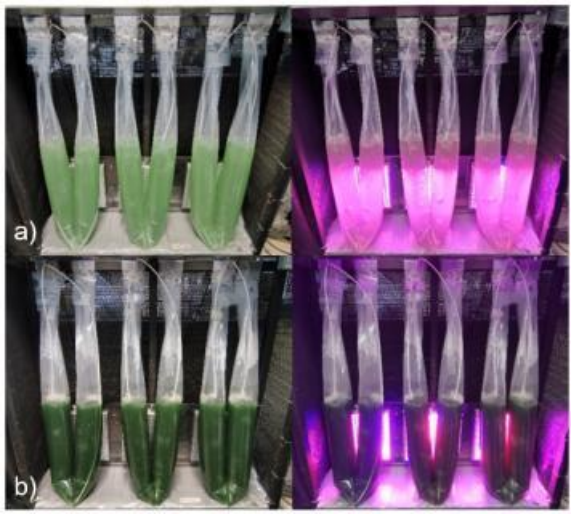


***Figura 16.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (AP-6NJ). a) Inicio b) Final.

Cada una de las muestras experimentales obtenidas de los montajes fue resguardada en refrigeración (TOR REY) a 5 °C, esto para evitar riesgo de contaminación, estrés o muerte celular.

### 6.4.3 Equipos e Insumos

El montaje experimental también incluyó el uso de distintos tipos de mangueras, tubos de PVC, tornillos, cinta adhesiva industrial gris, cinchos, válvulas, rotámetros FLOW METER ACRYLIC para la aireación y lámparas LED i-Venoya, junto con un luxómetro Spectrum Technologies, Inc. para la medición de luz.

## 6.5 Análisis Fisicoquímicos y Bioquímicos en el Cultivo de *A. platensis*

### 6.5.1 Análisis Fisicoquímicos del Medio y Crecimiento Celular

Cada dos días se realizaron muestreos directamente de las bolsas (biorreactores) con el fin de evaluar el crecimiento celular mediante densidad óptica y recuento celular, así como de determinar oxígeno disuelto, pH, temperatura, potencial óxido-reducción, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y salinidad. De manera adicional, se recolectaron 50 mL de muestra, los cuales se dejaron sedimentar durante 10 minutos y posteriormente se filtraron utilizando una bomba de vacío libre de aceite (ROCKER 6000) y filtros de 0.45 µm de porosidad y 47 mm de diámetro, para llevar a cabo los análisis fisicoquímicos correspondientes (DQO, amonio y ortofosfatos).

#### 6.5.1.1 Crecimiento Celular

El crecimiento celular se evaluó cada dos días mediante espectrofotometría a 680 nm*, empleando un espectrofotómetro Evolution 201 (Thermo Scientific, China). A partir de estos datos, la concentración celular (g $L^{-1}$) se estimó utilizando la ecuación derivada de la curva obtenida en la gráfica de crecimiento.

Adicionalmente, se llevó a cabo el recuento celular utilizando una cámara de Neubauer (Marienfeld, Germany) y un microscopio modelo CxL (Labomed, USA).

#### 6.5.1.2 Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto se determinó cada dos días utilizando un medidor portátil de la marca Hanna Instruments (HI 98193), el cual permitió cuantificar la concentración de oxígeno presente en el cultivo, obteniéndose los valores correspondientes expresados en mg/L.

#### 6.5.1.3 pH, Temperatura, Potencial Óxido Reducción, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Salinidad

Cada dos días se midió el pH, la temperatura, el potencial óxido reducción, la conductividad eléctrica, los sólidos totales disueltos y la salinidad de cada uno de los cultivos de estudio, utilizando un téster multiparamétrico (pH-W218) Cada dos días se registró el pH, la temperatura, el potencial óxido-reducción, la conductividad eléctrica, los sólidos totales disueltos y la salinidad de cada uno de los cultivos de estudio, empleando un téster multiparamétrico (pH-W218), lo que permitió el monitoreo integral de las condiciones fisicoquímicas del sistema.

#### 6.5.1.4 Demanda Química de Oxígeno

La concentración de DQO se determinó mediante el método colorimétrico de reflujo cerrado definido en (APHA, 2017). Este se aplicó en muestras previamente centrifugadas y filtradas. Para ello, se tomaron 2.5 mL de muestra, a los cuales se añadieron 1.5 mL de la solución de digestión 1 y 3.5 mL de la solución de digestión 2, correspondiente a sulfato de plata en ácido sulfúrico. Posteriormente, las muestras se sometieron a digestión durante 2 horas a 150 °C en un digestor (HACH COD Reactor), tras lo cual se midió la absorbancia a 600 nm*. Con base en la ecuación obtenida de la curva de calibración, se calculó la concentración de DQO, expresada en mg/L.

#### 6.5.1.5 Amonio

La concentración de amonio se determinó mediante el método del fenol estipulado en (APHA, 2017). Para ello, se tomaron 2.5 mL de muestra, a los cuales se añadieron 1.0 mL y 1.5 mL de la solución de fenol-nitroprusiato, así como 1.5 mL de la solución oxidante. Posteriormente, las muestras se mantuvieron durante 45 minutos a temperatura ambiente y en completa oscuridad, tras lo cual se midió la absorbancia a 635 nm*. La curva de calibración se elaboró utilizando una solución de cloruro de amonio, considerando siete puntos en un rango de 0.1 ppm de $N\text{-}NH_4^+$. Con base en la ecuación obtenida de la curva, se calculó la concentración de amonio, expresada en mg/L.

#### 6.5.1.6 Ortofosfatos

La determinación de ortofosfatos se llevó a cabo mediante el método del ácido ascórbico (4500-P) establecido en (APHA, 2017). Para ello, se tomaron 5 mL de muestra diluida en una proporción 1:25, a los cuales se adicionaron 0.8 mL de la solución combinada. Posteriormente, las muestras se agitaron en vórtex y se dejaron reposar durante 10 minutos, antes de realizar la lectura de absorbancia a 880 nm* en un espectrofotómetro UV-Vis. La curva de calibración se elaboró a partir de una solución madre de fosfato monobásico de potasio ($KH_2PO_4$); utilizando cinco puntos de calibración se obtuvo la ecuación de la curva, con la cual se calculó la concentración de ortofosfatos, expresada en mg/L.

### 6.5.2 Análisis Bioquímicos de la Biomasa

Al término de los 11 días de cultivo, las muestras experimentales correspondientes a esta fase se cosecharon mediante filtración, utilizando una malla de serigrafía, y posteriormente se sometieron a liofilización. A partir de la biomasa seca se determinaron los contenidos de lípidos y ficocianina; lo cual se describe a continuación.

#### 6.5.2.1 Lípidos

Los lípidos se determinaron mediante el método de Bligh y Dyer (1959). Para este análisis se utilizaron 0.1 g de biomasa seca de *A. platensis*, los cuales se depositaron en un tubo Falcon, al que se añadieron 6 ml de cloroformo y 3 ml de etanol. La mezcla se sometió a sonicación en un sonicador (DIGITAL ULTRASONIC CLEANER PS-08A) durante 30 min y posteriormente se centrifugó a 5000 rpm por 10 min a 5 °C. El sobrenadante obtenido se transfirió a crisoles previamente pesados y llevados a peso constante. Estos se colocaron en una estufa de secado a 105 °C. Tras 24 h, una vez evaporado completamente el sobrenadante, los crisoles se enfriaron en un desecador y se registró el peso final.

El cálculo de % lipídico de acuerdo con la ecuación.

$$Contenido\ lipídico\ (\%) = \frac{WL}{WA} x\ 100$$

Donde:
$W_L$ es la diferencia de peso de los crisoles (g)
$W_A$ es el peso de la muestra (g)
*para todos los análisis, se realizaron mediciones por cuadruplicado.

#### 6.5.2.2 Ficocianina

La extracción de c-ficocianina a partir de *Arthrospira platensis* se realizó mediante el método de buffer-agitación. Al finalizar el ciclo correspondiente, los tubos fueron centrifugados a 4000 rpm durante 5 min, y el sobrenadante se analizó en un espectrofotómetro UV-Vis a longitudes de onda de 652, 620, 562 y 280 nm. La concentración de c-ficocianina se calculó utilizando la ecuación 5 propuesta por Bennett y Bogorad (1973).

$$C - PC(mg/ml) = (A_{620} - 0.474\ x\ A_{652})/5.34$$

Cabe mencionar que únicamente fueron considerados controles y tratamientos funcionales. Esto quiere decir que el tratamiento AR-O fue descartado, debido a que no posee las condiciones necesarias para que la cianobacteria *A. platensis* pueda proliferar y, con esto, cumplir sus funciones naturales. Por lo tanto, los análisis anteriormente mencionados fueron trabajados sobre el control AP-6NJ y dos de los tratamientos AR-O-2NJ, AR-O-6NJ. Esto se puede apreciar en la Figura 17.

***Figura 17.*** Análisis de biomasa microalgal de tratamientos funcionales mediante la determinación de lípidos y ficocianina.

### 6.5.3 Análisis Estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante el programa estadístico Minitab. Para la evaluación de las condiciones óptimas de crecimiento, se aplicó el método Taguchi considerando nueve controles experimentales de *Arthrospira platensis* cultivada en agua purificada enriquecida con los nutrientes del medio Jourdan. Posteriormente, se realizó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey entre los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* cultivados en efluente residual de Rechazo de Ósmosis, empleando un nivel de significancia estadística previamente establecido.

## 6.6 Efluentes Residuales

### 6.6.1 Pruebas Preliminares

Se evaluó el comportamiento de *A. platensis* en cada uno de los efluentes residuales previamente caracterizados. Se llevaron a cabo pruebas preliminares cualitativas para determinar la viabilidad de cada agua residual como medio de crecimiento y esto se puede apreciar, en los diferentes cultivos presentados en las Figuras 18–21.

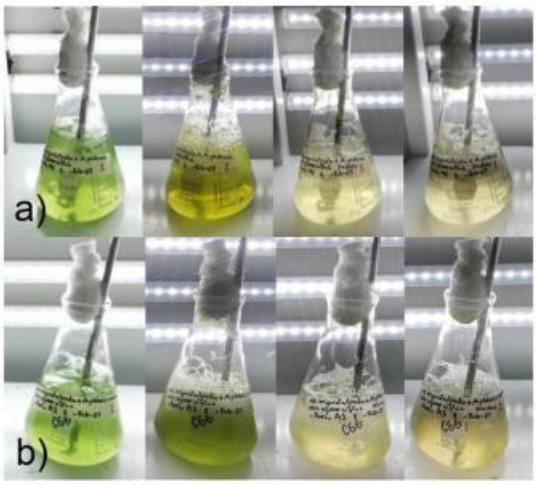


***Figura 18.*** Prueba preliminar de *Arthrospira platensis* en agua residual de Irrigación sin cloro/Cruda. a) Sin nutrientes Jourdan b) Con 6/6 nutrientes Jourdan.

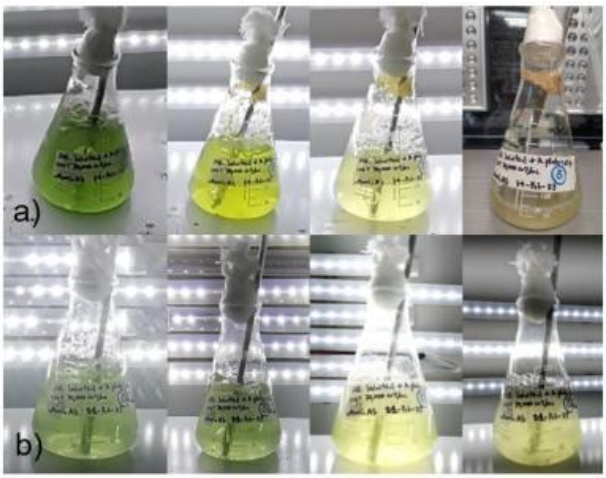


***Figura 19.*** Prueba preliminar de *Arthrospira platensis* en agua residual Industrial/Coagulación-Floculación. a) Sin nutrientes Jourdan b) Con 6/6 nutrientes Jourdan.

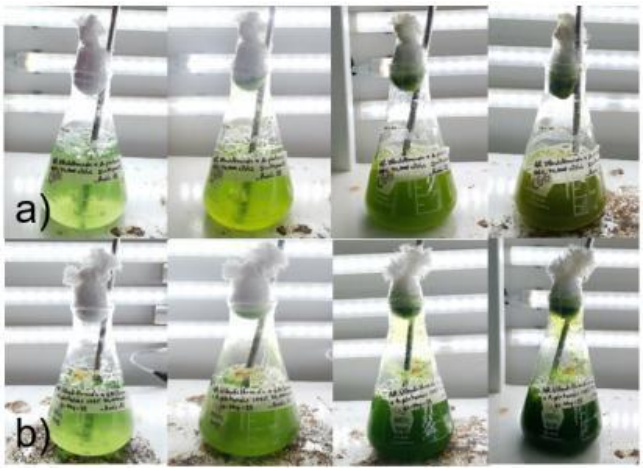


***Figura 20.*** Prueba preliminar de *Arthrospira platensis* en agua residual de Rechazo de Ultrafiltración. a) Sin nutrientes Jourdan b) Con 6/6 nutrientes Jourdan.

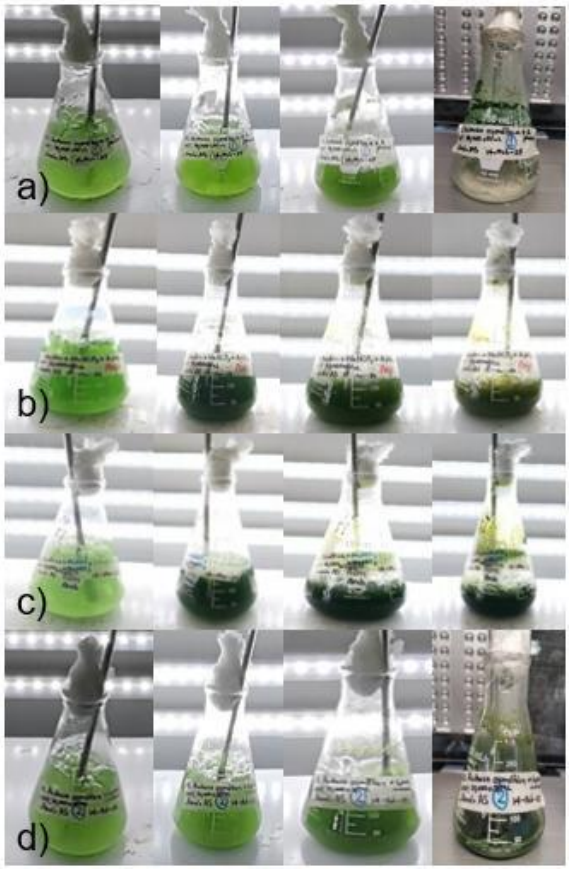


***Figura 21.*** Prueba preliminar de *Arthrospira platensis* en agua residual de Rechazo de Ósmosis. a) Sin nutrientes Jourdan b) Con 1/6 nutrientes Jourdan c) Con 2/6 nutrientes Jourdan d) Con 6/6 nutrientes Jourdan.

### 6.6.2 Tratamientos Experimentales

Se seleccionó el efluente más adecuado (Rechazo de Ósmosis) y se realizó un experimento por triplicado a gran escala durante 11 días, siguiendo los mismos análisis de monitoreo y manejo posmontaje utilizados en la búsqueda de las condiciones óptimas, como puede apreciarse en las Figuras 22–24. Después, se completó la caracterización inicial y final entre blancos y tratamientos.

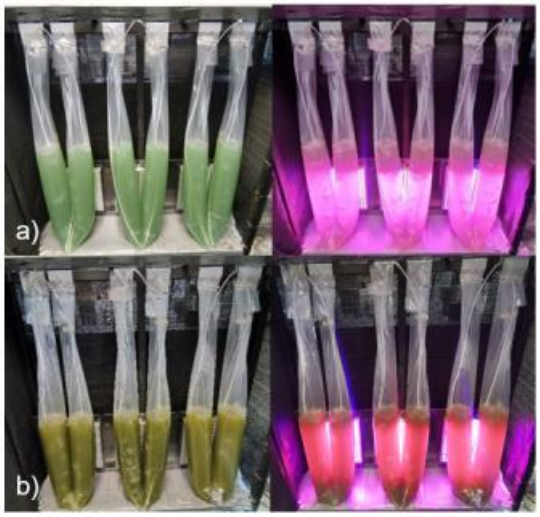


***Figura 22.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* sin nutrientes Jourdan en agua residual de Rechazo de Ósmosis (AR-O). a) Inicio b) Final.

***Figura 23.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 2/6 nutrientes Jourdan en agua residual de Rechazo de Ósmosis (AR-O-2NJ). a) Inicio b) Final.

***Figura 24.*** Montaje experimental de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua residual de Rechazo de Ósmosis (AR-O-6NJ). a) Inicio b) Final.

### 6.6.3 Sobrante Experimental de la Fase I

Al término de cada experimento, la biomasa obtenida fue cosechada mediante mallas de serigrafía de 165 hilos, almacenada en tubos Falcon de 50 mL y congelada (TOR REY) a -20 °C. Después, las muestras fueron sometidas a procesos de liofilización (FREEZE DRYER), triturado y almacenamiento para análisis futuros, como se observa en las detalladas Figuras 25 y 26.

***Figura 25.*** Cosechado y triturado de biomasa de *Arthrospira platensis* postratamiento microalgal.

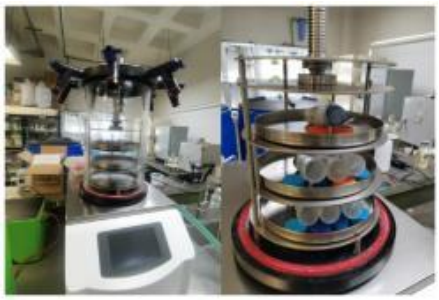

***Figura 26.*** Liofilizado y almacenado de muestras de biomasa de *Arthrospira platensis* postratamiento microalgal.

#### 6.6.3.1 Biocarbón

Se llevó a cabo la producción y el acondicionamiento de biocarbón a partir del sobrante experimental de biomasa microalgal postratada, generado en esta Fase. Esta decisión metodológica se fundamentó en criterios técnicos, experimentales y de pertinencia con los objetivos del estudio. La biomasa microalgal obtenida presentó características fisicoquímicas homogéneas, bajo contenido de humedad, menor carga microbiológica y una composición orgánica definida, lo que la convierte en un precursor adecuado para procesos de carbonización controlada y posterior acondicionamiento químico.

Dicho eso, se realizaron algunas pruebas preliminares basadas en literatura de “biochar”, para la generación de biocarbón a partir de biomasa seca y pulverizada de Espirulina comercial (Superfoods 100% PURE) a modo de sustrato. Para esto, se pesaron 5 g de Espirulina, equivalentes a 2.97 ml de $H_3PO_4$ al 85 %, lo anterior derivado de la densidad de la solución de ácido fosfórico (1.685 g/ml) y de su peso molecular (98.00). Ambos componentes se mezclaron hasta humedecerse completamente (utilizando un crisol) y se dejaron en reposo de entre 12 a 24 horas a temperatura ambiente para la impregnación, siguiendo metodologías de activación química con ácido fosfórico reportadas para biomasas microalgales y lignocelulósicas (Saka et al., 2020; Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Después, las muestras fueron secadas a 105 °C durante 12 horas, hasta alcanzar peso constante, condición comúnmente empleada para favorecer la fijación del agente activante previo a la carbonización (Liou, 2010). Una vez secada la biomasa impregnada, esta fue introducida en la máquina (Samlab–Nanyang Dadi Electric Equipment CO., LTD–SK2 Series–Split Type High Temperature Vacuum Tube Furnace), la cual se conecta a una bomba de vacío y a un tanque de nitrógeno (LÍNEA INDUSTRIAL INFRA). En el equipo se configuraron los parámetros correspondientes a cada etapa del proceso. En primer lugar, se programó una rampa automática de calentamiento hasta 200 °C con una duración de 35 minutos, durante la cual se eliminó la humedad superficial y se iniciaron las transformaciones térmicas primarias del sustrato. Posteriormente, la temperatura se mantuvo en 200 °C durante 30 minutos para asegurar la homogeneización térmica y favorecer la descomposición controlada de compuestos volátiles ligeros.

Posteriormente, el sistema continuó con una rampa automática de incremento de temperatura hasta alcanzar 450 °C en un tiempo aproximado de 83 minutos, lo que permitió el avance de las reacciones de carbonización. Una vez alcanzada la temperatura máxima, esta se mantuvo por 60 minutos para completar la conversión térmica del material y favorecer la formación estructural del biocarbón bajo atmósfera inerte de nitrógeno ($N_2$), condiciones térmicas reportadas como adecuadas para la obtención de biocarbones activados a partir de biomasa microalgal y residuos orgánicos (Jung et al., 2015; Liou, 2010). Finalmente, se llevó a cabo un enfriamiento controlado del horno durante un tiempo final de -121 minutos (valor predeterminado por el sistema), con la finalidad de un descenso térmico, manteniendo el flujo de gas inerte hasta alcanzar temperatura cercana a ambiente. Al concluir, se cerró el programa y se extrajo el biocarbón para su posterior acondicionamiento y análisis, considerando su potencial aplicación como material adsorbente ambiental (Ahmad et al., 2014).

El biocarbón obtenido se colocó en un desecador durante aproximadamente 30 minutos, con la finalidad de eliminar humedad residual y evitar rehidratación atmosférica previa a su acondicionamiento. Posteriormente, el biocarbón seco fue sometido a un proceso de reducción de tamaño de partícula mediante trituración manual en mortero de porcelana, hasta obtener un material pulverizado de granulometría fina y apariencia homogénea. Cabe señalar que no se realizó una clasificación granulométrica mediante tamizado, por lo que el tamaño de partícula no fue determinado de forma cuantitativa.

A continuación, se realizó el lavado de 1 g de biocarbón con 30 mL de agua destilada, manteniéndose a 80 rpm de agitación rotatoria (BIOBASE) durante 30 minutos. Después, la mezcla se centrifugó a 4000 rpm durante 10 minutos y se procedió a la medición del pH, siguiendo procedimientos de purificación posteriores a la activación química para remover agentes residuales (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Más adelante, el biocarbón se sometió a un lavado alcalino con el objetivo de eliminar residuos ácidos y fosfatos, mediante su mezcla con 30 mL de una solución de NaOH 0.5 M. La suspensión se mantuvo nuevamente en agitación durante 30 minutos, se centrifugó y se desechó el sobrenadante. Posteriormente, el biocarbón se resuspendió en 30 mL de agua destilada, se dejó en agitación durante 30 minutos, se centrifugó y se realizó nuevamente la lectura del pH. Este tipo de acondicionamiento químico ha sido reportado como parte del post-tratamiento de carbones activados obtenidos por impregnación con $H_3PO_4$ (Saka et al., 2020). Este procedimiento se llevó a cabo con la finalidad de ajustar el pH del biocarbón a un valor cercano a 7, considerando un rango aceptable entre 6 y 8. En caso de obtener un pH fuera de este intervalo, se continuaron realizando lavados sucesivos hasta alcanzar el rango establecido, utilizando agua destilada para disminuir el pH o una solución buffer para incrementarlo, según correspondiera, de acuerdo con metodologías de neutralización de biocarbones activados químicamente (Jung et al., 2015).

Finalmente, se desechó el sobrenadante y el biocarbón con pH ajustado se colocó en un crisol, el cual se introdujo en una estufa a 105 °C durante 12 horas. Transcurrido este tiempo, el crisol se retiró de la estufa y se dejó en un desecador durante 30 minutos, para posteriormente resguardarse en un tubo Falcon, asegurando su estabilidad fisicoquímica previo a su caracterización (Liou, 2010).

La temperatura máxima de pirólisis empleada durante el proceso fue de 450 °C, alcanzada mediante una rampa controlada de calentamiento y mantenida durante un tiempo de residencia de 60 minutos bajo atmósfera inerte de nitrógeno ($N_2$), conforme a la programación previamente descrita. El tiempo total del programa térmico fue de aproximadamente 329 minutos (5 h 29 min), incluyendo las etapas de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento controlado.

En cuanto a la caracterización fisicoquímica del material obtenido, se evaluó el pH posterior a los procesos de lavado ácido y alcalino hasta su ajuste dentro del intervalo de 6 a 8. No se realizaron determinaciones de área superficial específica ni contenido de cenizas en el biocarbón generado, por lo que la caracterización se limitó a parámetros operativos del proceso de pirólisis, rendimiento másico y evaluación de pH.

El rendimiento másico del biocarbón fue determinado mediante la relación entre la masa seca final obtenida posterior a la pirólisis y la masa seca inicial del sustrato impregnado, conforme a la siguiente expresión:

$$R(\%) = \left(\frac{mf}{mi}\right) \times 100$$

donde $mf$ corresponde a la masa final de biocarbón seco (g) y $mi$ a la masa seca inicial del sustrato (g).

Siguiendo esta metodología, se generó biocarbón a partir de una de las biomasas microalgales obtenidas en los tratamientos anteriores, utilizando como sustrato la muestra AR-O-2NJ, tal como se muestra en la Figura 27. Cabe mencionar que cualquiera de las tres muestras de biomasa microalgal hubieran sido aptas para generar biocarbón; sin embargo, únicamente fue seleccionado el tratamiento AR-O-2NJ debido a que esta fue la muestra que más destacó positivamente en la mayoría de análisis y resultados.

***Figura 27.*** Sobrante experimental de biomasa microalgal (AR-O-2NJ) postratada como sustrato para generación de biocarbón mediante pirólisis.

## 6.7 Fase II: Microorganismos Anaerobios para Digestión de Lodos y Alimentos Residuales

### 6.7.1 Materia Prima de la Fase II

Para la fase 2, se llevó a cabo una visita a la planta INTERNATIONAL, ubicada en el municipio de Escobedo, N. L., esto con la finalidad de identificar y determinar los diferentes tipos de residuos generados, entre ellos, lodos, efluentes y residuos alimentarios. Después, se seleccionó el lodo más apto para el proceso de digestión anaerobia, siendo este el lodo de filtro prensa o Torta. Se recolectaron aproximadamente 500 g de muestra de este lodo. Asimismo, se obtuvieron alrededor de 10 L de efluente residual de irrigación sin cloro o crudo y aproximadamente 450 g de residuos alimentarios, compuestos por cáscaras de melón, plátano y manzana. Estos materiales se destinaron a los estudios posteriores de la investigación.

Todos los residuos fueron trasladados a la Subsede Noreste del CIATEJ, ubicada dentro del Parque de Investigación e Innovación Tecnológica (PIIT), en el municipio de Apodaca, N. L. Allí se procedió a la aclimatación y preparación de los residuos provenientes de INTERNATIONAL. En primer lugar, se trituraron 100 g de lodo de Torta y se mezclaron en 1 L de efluente residual crudo. Esto se puede apreciar en la Figura 28.

***Figura 28.*** Mezcla de lodo residual de filtro prensa/Torta y efluente residual de irrigación sin cloro/Crudo (Residuo n.º 1).

Posteriormente, a los residuos alimentarios se les añadió agua de la llave y fueron licuados en una licuadora industrial (Heavy Duty Blender Waring Commercial, EE. UU.), como se muestra en la Figura 29. Ambos residuos fueron etiquetados, almacenados en recipientes cerrados y conservados en refrigeración a 7 °C. De este modo, quedaron listos para su análisis.

***Figura 29.*** Triturado de residuos alimentarios de melón, manzana y plátano en agua de la llave mediante licuadora industrial (n.º 2).

### 6.7.2 Caracterización Inicial

#### 6.7.2.1 pH, Sólidos Totales y Volátiles, DQO Total y Soluble, Nitrógeno Total y Fósforo Total

En la caracterización inicial se determinaron los siguientes parámetros: pH en potenciómetro (Thermo Scientific ORION STAR A215), sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (Sv) en balanza analítica (A&D Weighing, serie GALAXY, modelo HR-100A), estufa (Novatech), desecador (Bel-Art/SP Scienceware) y mufla (Thermo Scientific THERMOLYNE), demanda química de oxígeno total (DQO) y demanda química de oxígeno soluble ($DQO_s$), nitrógeno total (NT) y, por último, fósforo total (PT). Para los cinco análisis anteriores también se utilizaron los siguientes equipos: centrífuga (IKA G-L), agitador (Scientific Industries Vortex-Genie 2), digestor (Hanna Instruments HI839800 COD Reactor) y lector (Hanna HI83399 Multiparameter Photometer with COD). Estos datos permitieron establecer una línea base para evaluar los porcentajes de remoción durante el proceso de codigestión anaerobia.

### 6.7.3 Diseño Experimental de la Fase II

Los residuos de lodos (R1) y alimentos (R2), así como sus mezclas (MR), fueron trabajados en botellas serológicas que funcionaron como reactores anaerobios. Para cada condición experimental se establecieron tres réplicas biológicas independientes. Cada reactor fue preparado e inoculado de manera individual, constituyendo una unidad experimental autónoma para efectos de análisis estadístico.

En el caso de los controles, se emplearon 18 reactores correspondientes a los residuos individuales R1 y R2. Cada residuo fue evaluado bajo tres proporciones distintas de lodo anaerobio (LA): 10 %, 20 % y 30 %. Cada una de estas combinaciones fue trabajada por triplicado. La configuración de los sistemas control se muestra en la Figura 30.

***Figura 30.*** Lodos activados o lodos anaerobios (LA) contienen bacterias capaces de degradar contaminantes y generar biogás.

Las combinaciones evaluadas para los controles fueron las siguientes:

- 70 % de R1/R2 con 30 % de LA.
- 80 % de R1/R2 con 20 % de LA.
- 90 % de R1/R2 con 10 % de LA.

Para los tratamientos, se utilizaron 27 reactores integrados por la mezcla de residuos R1 y R2 (MR), también denominada sustrato. Estas mezclas fueron preparadas en tres proporciones distintas: 25:75, 50:50 y 75:25. Cada una de estas proporciones fue combinada con tres porcentajes de LA (10 %, 20 % y 30 %), estableciendo igualmente tres réplicas biológicas independientes por cada combinación. La configuración general de los sistemas experimentales se presenta en las Figuras 31 y 32.

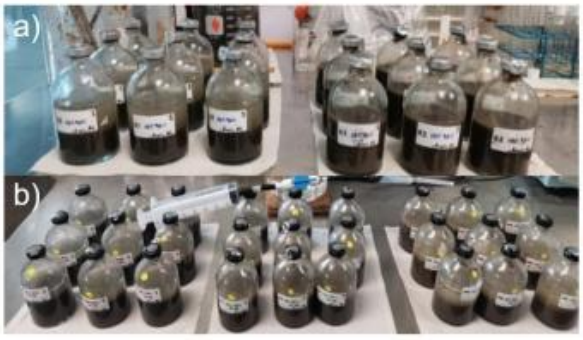


***Figura 31.*** Experimentos realizados por triplicado. a) Digestión anaerobia (controles) b) Codigestión anaerobia (tratamientos).

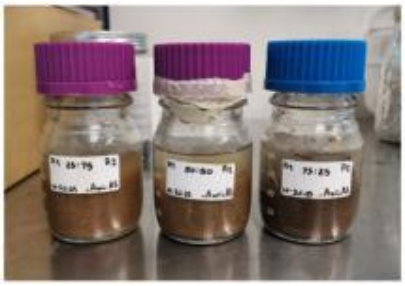

***Figura 32.*** Mezcla de los residuos n.º 1 y n.º 2 a tres proporciones distintas.

Las combinaciones evaluadas para los tratamientos fueron las siguientes:

- 70 % de MR (25:75, 50:50 y 75:25) con 30 % de LA.
- 80 % de MR (25:75, 50:50 y 75:25) con 20 % de LA.
- 90 % de MR (25:75, 50:50 y 75:25) con 10 % de LA.

A continuación, se presenta el Cuadro 4, en el cual se encuentran las muestras residuales de estudio (R) y sus respectivas cantidades agregadas de lodo anaerobio (LA).

***Cuadro 4.*** Cantidades específicas correspondientes a la combinación de residuos (R/MR) y lodo anaerobio (LA).

| Muestra experimental | R/MR – LA | R/MR | LA |
|---|---|---|---|
| R1 100:0 (mL) | 70% – 30% | 56 | 24 |
| | 80% – 20% | 64 | 16 |
| | 90% – 10% | 72 | 8 |
| R2 0:100 (mL) | 70% – 30% | 56 | 24 |
| | 80% – 20% | 64 | 16 |
| | 90% – 10% | 72 | 8 |
| MR 25:75 (mL) | 70% – 30% | 56 (14:42) | 24 |
| | 80% – 20% | 64 (16:48) | 16 |
| | 90% – 10% | 72 (18:54) | 8 |
| MR 50:50 (mL) | 70% – 30% | 56 (28:28) | 24 |
| | 80% – 20% | 64 (32:32) | 16 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 90% – 10% | 72 (36:36) | 8 |
| | 70% – 30% | 56 (42:14) | 24 |
| MR 75:25 (mL) | 80% – 20% | 64 (48:16) | 16 |
| | 90% – 10% | 72 (54:18) | 8 |

### 6.7.4 Medición de la Producción de Biogás (Metano)

En cada reactor (controles y tratamientos) se midió la producción de biogás, expresada en mililitros (mL), mediante un sistema de probeta invertida con una solución de hidróxido de sodio al 2 %. Este sistema se muestra en la Figura 33.

***Figura 33.*** Sistema de probeta invertida para medición de la producción de biogás (metano).

En él, el biogás fue purificado a través de su propia columna, permitiendo la eliminación de otros gases y dejando principalmente metano ($CH_4$) en mayor proporción. Los reactores se mantuvieron sin agitación, sin iluminación específica y a temperatura ambiente durante un periodo de 21 días. Los datos obtenidos fueron procesados y evaluados empleando el modelo de Gompertz.

### 6.7.5 Caracterización Final

Se llevó a cabo una caracterización final en la que se determinaron los mismos parámetros que en la caracterización inicial (pH, ST, Sv, DQO, $DQO_s$, NT y PT). Posteriormente, a través de los análisis del lodo anaerobio (LA), se dieron a conocer los valores de aporte resultantes de la mezcla del mismo en las diferentes muestras estudiadas (R), valores que le fueron restados a los valores obtenidos de la caracterización final de controles y tratamientos. Esto puede observarse en el Cuadro 5.

***Cuadro 5.*** Análisis de lodo anaerobio (LA) para determinación de la diferencia resultante del agregado del mismo en residuos de controles y tratamientos poscodigestión anaerobia.

| Variable de estudio | Valor obtenido de LA | Cantidad agregada de LA | Diferencia del agregado de LA |
|---|---|---|---|
| DQO (mg/L) | 158000 | 0.3 | 47400 |
| | 158000 | 0.2 | 31600 |
| | 158000 | 0.1 | 15800 |
| $DQO_s$ (mg/L) | 1200 | 0.3 | 360 |
| | 1200 | 0.2 | 240 |
| | 1200 | 0.1 | 120 |
| ST (mg/L) | 129696 | 0.3 | 38908.0 |
| | 129696 | 0.2 | 25939.2 |
| | 129696 | 0.1 | 12969.6 |
| Sv (mg/L) | 532911 | 0.3 | 159873.3 |
| | 532911 | 0.2 | 106582.2 |
| | 532911 | 0.1 | 53291.1 |
| NT (mg/L) | 3800 | 0.3 | 1140 |
| | 3800 | 0.2 | 760 |
| | 3800 | 0.1 | 380 |
| PT (mg/L) | 1700 | 0.3 | 510 |
| | 1700 | 0.2 | 340 |
| | 1700 | 0.1 | 170 |

Como fue mencionado anteriormente, se monitoreó la producción de metano para cada uno de los seis controles y nueve tratamientos evaluados.

En el Cuadro 6 se presentan las producciones máximas acumuladas de metano ($CH_4$) obtenidas en cada una de las muestras del estudio, así como la energía potencial recuperada estimada a partir de dichos volúmenes. Esta información permite comparar el desempeño de los sistemas en términos tanto volumétricos como energéticos.

***Cuadro 6.*** Producción máxima alcanzada de metano ($CH_4$) y energía potencial recuperada en función de las cantidades y proporciones específicas establecidas en las mezclas de muestras de estudio (R) y lodo anaerobio (LA).

| Muestra experimental | R/MR – LA | $CH_4$ | Energía (MJ) |
|---|---|---|---|
| R1 100:0 (mL) | 70% – 30% | 28 | 0.0010 |
| | 80% – 20% | 26 | 0.0009 |
| | 90% – 10% | 25 | 0.0009 |
| R2 0:100 (mL) | 70% – 30% | 1071 | 0.0384 |
| | 80% – 20% | 362 | 0.0130 |
| | 90% – 10% | 283 | 0.0101 |
| MR 25:75 (mL) | 70% – 30% | 847 | 0.0303 |
| | 80% – 20% | 806 | 0.0289 |
| | 90% – 10% | 284 | 0.0102 |
| MR 50:50 (mL) | 70% – 30% | 573.7 | 0.0205 |
| | 80% – 20% | 667 | 0.0239 |
| | 90% – 10% | 593 | 0.0212 |
| MR 75:25 (mL) | 70% – 30% | 325.7 | 0.0117 |
| | 80% – 20% | 379.7 | 0.0136 |
| | 90% – 10% | 441.7 | 0.0158 |

### 6.7.6 Modelo Matemático de Gompertz

Los valores del modelo de Gompertz se calcularon utilizando la siguiente ecuación:

$$Gompertz = Hmax * exp(-exp((2.7183 * Rmax) / (Hmax * (Lambda - Hora)) + 1))$$

Donde Gompertz representa la producción estimada de biogás en función del tiempo. Hmax es la producción máxima potencial, Rmax la máxima velocidad de producción y Lambda la fase de retraso antes del incremento exponencial. La variable Hora corresponde al tiempo evaluado. La constante e es la base de los logaritmos naturales y exp() denota la función exponencial. En conjunto, estos parámetros describen la curva típica de producción de biogás, desde la fase de adaptación hasta su estabilización final.

El ajuste del modelo se realizó mediante regresión no lineal a partir de los datos experimentales de producción acumulada de biogás, con el objetivo de estimar los parámetros cinéticos Hmax, Rmax y Lambda que describen el comportamiento dinámico del proceso. La selección del modelo de Gompertz se fundamenta en su capacidad para representar procesos biológicos con fase de adaptación inicial, crecimiento exponencial y estabilización, características típicas de la digestión anaerobia. El ajuste permitió evaluar la coherencia entre los datos experimentales y la cinética esperada, así como comparar el desempeño entre tratamientos y controles bajo un mismo marco matemático.

Adicionalmente, la calidad del ajuste del modelo se evaluó mediante el coeficiente de determinación ($R^2$) y el error cuadrático medio (RMSE), calculados a partir de la comparación entre los valores experimentales y los valores predichos por el modelo. El coeficiente de determinación permitió estimar la proporción de variabilidad explicada por el modelo cinético, mientras que el RMSE proporcionó una medida de la magnitud promedio del error del ajuste. Estos indicadores fueron utilizados como criterios estadísticos para validar la pertinencia del modelo de Gompertz en la descripción de la cinética de producción de metano.

### 6.7.7 Cálculo del Porcentaje de Remoción

El porcentaje de remoción se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$Remoción\ (\%) = \frac{Ci - Cf}{Ci} * 100$$

Donde Ci y Cf corresponden a las concentraciones inicial y final de cada uno de los análisis por muestra antes y después de la codigestión anaerobia.

En el caso específico de la demanda química de oxígeno soluble ($DQO_s$), se observaron en algunos tratamientos incrementos en la concentración final respecto a la inicial. Este comportamiento se asocia al fenómeno de solubilización derivado de la etapa de hidrólisis, en la cual compuestos orgánicos particulados o de mayor complejidad estructural son transformados en fracciones solubles. Desde un punto de vista termodinámico y cinético, este proceso representa una conversión de materia orgánica y no una generación adicional de carga contaminante.

Por lo anterior, cuando Cf fue mayor que Ci, el resultado fue interpretado como indicador de solubilización de materia orgánica y no como una remoción negativa, especificándose dicha condición en el análisis y discusión de resultados.

Las concentraciones iniciales y finales utilizadas para el cálculo corresponden a los valores promedio obtenidos de las determinaciones analíticas realizadas para cada tratamiento. El porcentaje de remoción se empleó como indicador comparativo de eficiencia del proceso de codigestión, permitiendo evaluar la transformación o solubilización de la materia orgánica bajo las condiciones experimentales establecidas. Este parámetro facilita la interpretación integral del desempeño del sistema en términos de reducción de carga contaminante.

### 6.7.8 Estimación del Rendimiento de Metano

El rendimiento de metano se calculó utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Rendimiento\ CH_4\ \left(\frac{mL}{mg/L}\right) = \frac{Mf}{Ci - Cf}$$

$$Rendimiento\ CH_4\ \left(\frac{mL}{\%}\right) = \frac{Mf}{Ci - Cf}$$

Donde Ci y Cf corresponden a las concentraciones inicial y final de cada uno de los análisis por muestra antes y después de la codigestión anaerobia. Mf corresponde al último dato producido de metano durante el lapso de los 21 días experimentales de lecturas diarias mediante el uso del sistema de probeta invertida.

El rendimiento de metano se estimó considerando la producción acumulada al término del periodo experimental de 21 días, tiempo seleccionado con base en la estabilización observada en las curvas de producción de biogás. Esta estimación permitió comparar la eficiencia de conversión de sustrato entre tratamientos, relacionando la generación de metano con la transformación de materia orgánica. En los casos donde se empleó la $DQO_s$ como referencia, la interpretación del término (Ci − Cf) consideró los posibles efectos de solubilización ocurridos durante la hidrólisis, evitando atribuir incrementos de fracción soluble a generación adicional de carga orgánica. La expresión empleada constituye un indicador práctico de desempeño energético del sistema bajo las condiciones operativas evaluadas.

Los valores reportados fueron expresados con el número de decimales resultante del procesamiento estadístico; no obstante, la interpretación comparativa se realizó considerando la resolución instrumental del sistema de medición.

Para el caso del rendimiento expresado en función de sólidos volátiles, el término (Ci − Cf) correspondió a la concentración de Sv añadidos o removidos, según el análisis realizado.

### 6.7.9 Sobrante Experimental de la Fase II

El sobrante experimental de muestras codigeridas de controles y tratamientos se resguardó en congelación a -50 °C para evitar contaminación y la posibilidad de usos futuros.

El resguardo del material experimental permite la posibilidad de realizar análisis complementarios posteriores, tales como caracterización adicional de sólidos o estudios de valorización, en caso de requerirse para ampliar la interpretación de los resultados obtenidos. Esta práctica garantiza trazabilidad experimental y disponibilidad de muestra ante eventuales verificaciones analíticas.

# 7. RESULTADOS

Desde una perspectiva integral, los resultados obtenidos en las dos fases del presente estudio no deben interpretarse como experimentos aislados, sino como componentes de un esquema acoplado de valorización de residuos industriales. La industria INTERNATIONAL genera diferentes corrientes residuales, efluentes líquidos, lodos y residuos orgánicos alimentarios, cuya naturaleza fisicoquímica requiere estrategias diferenciadas de tratamiento. En este contexto, la Fase I abordó el aprovechamiento de efluentes mediante el crecimiento controlado de *A. platensis*, evaluando tanto su adaptación como su capacidad de remoción de nutrientes y transformación de materia orgánica. Además, esta Fase también permitió convertir biomasa residual en biocarbón, integrando un enfoque de recuperación de subproductos. Por otra parte, la Fase II se enfocó en la valorización energética de lodos y residuos orgánicos mediante digestión y codigestión anaerobia. En la Fase II, la codigestión anaerobia mostró un desempeño superior respecto a la digestión individual, lo cual puede explicarse desde la cinética microbiana. La mezcla de sustratos favorece un balance más adecuado de carbono y nutrientes, promueve una mayor diversidad metabólica y reduce la acumulación localizada de intermediarios inhibitorios, facilitando la transición entre las etapas acidogénica y metanogénica. Este comportamiento sinérgico se refleja en mayores volúmenes acumulados de metano y en ajustes cinéticos robustos mediante el modelo de Gompertz, evidenciando estabilidad en la dinámica microbiana del sistema. Si bien la Fase I y la Fase II operan sobre corrientes residuales distintas, ambas comparten un mismo principio biotecnológico: la transformación de materia orgánica residual en productos de valor agregado. La primera mediante remoción de nutrientes, generación de biomasa microalgal y obtención de biocarbón y la segunda mediante remoción de materia orgánica y generación de biogás. Cerrando el ciclo y proponiendo un esquema que articula un tratamiento ambiental y el aprovechamiento de subproductos dentro de un mismo marco conceptual.

En conjunto, los resultados respaldan la viabilidad de un modelo integral de gestión biotecnológica de residuos industriales, en el que diferentes biosistemas pueden operar de manera complementaria sobre distintas fracciones residuales, contribuyendo a la reducción de impacto ambiental y a la generación de productos con potencial aplicación futura.

### 7.1 Materia Prima de la Fase I

Como fue mencionado previamente, los efluentes residuales de INTERNATIONAL seleccionados para ser evaluados en esta investigación fueron los siguientes: efluente residual de Irrigación clorada (AR-IC), efluente residual de Irrigación sin cloro/Cruda (AR-C), efluente residual Industrial/Coagulación-Floculación (AR-I), efluente residual de Rechazo de Ultrafiltración (AR-U) y efluente residual de Rechazo de Ósmosis (AR-O), de los cuales la caracterización indicó los resultados mostrados en el Cuadro 7.

***Cuadro 7.*** Caracterización de los diferentes tipos de efluentes residuales seleccionados provenientes de INTERNATIONAL.

| **Variable de estudio** | **AR-IC** | **AR-C** | **AR-I** | **AR-U** | **AR-O** |
|---|---|---|---|---|---|
| pH | 7.35 ± 0.02 | 7.27 ± 0.03 | 10.24 ± 0.03 | 8.17 ± 0 | 7.94 ± 0 |
| ST (mg/L) | 643.33 ± 45.36 | 665 ± 13.22 | 633.33 ± 15.27 | 478.33 ± 28.43 | 520 ± 30.41 |
| DQO (mg/L) | 119.08 ± 22.68 | 94.91 ± 7.63 | 396.58 ± 27.42 | 140.75 ± 2.5 | 150.54 ± 11.01 |
| Turbidez (NTU) | 7.67 ± 0 | 9.59 ± 0 | 170 ± 0 | 2.45 ± 0 | 2.04 ± 0 |

### 7.2 Análisis Fisicoquímicos en el Cultivo de *A. platensis*

#### 7.2.1 Crecimiento Celular

Al completar el tiempo experimental de los nueve controles apreciados y presentados en las bolsas de las Figuras 7–15, se obtuvieron las concentraciones

celulares expresadas en gramos por litro y células por mililitro, las cuales se muestran en los Cuadros 8 y 9. Estos valores permitieron establecer comparaciones directas del crecimiento de la cianobacteria bajo las distintas combinaciones de los parámetros evaluados.

***Cuadro 8.*** Concentración celular del crecimiento experimental con respecto a los nueve controles de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (g/L).

| Controles | Inicio (g/L) | Final (g/L) |
|---|---|---|
| AP1-6NJ | 0.0717 ± 0.0019 | 0.3918 ± 0.0464 |
| AP2-6NJ | 0.0015 ± 0.0058 | 0.5785 ± 0.0510 |
| AP3-6NJ | 0.1450 ± 0.0292 | 1.1327 ± 0.0386 |
| AP4-6NJ | 0.0838 ± 0.0177 | 0.5405 ± 0.0560 |
| AP5-6NJ | 0.1106 ± 0.0329 | 0.6895 ± 0.1460 |
| AP6-6NJ | 0.1137 ± 0.0137 | 0.9812 ± 0.0342 |
| AP7-6NJ | 0.2744 ± 0.0418 | 0.8381 ± 0.0817 |
| AP8-6NJ | 0.4226 ± 0.0176 | 1.0082 ± 0.0334 |
| AP9-6NJ | 0.1679 ± 0.0062 | 0.7679 ± 0.0534 |

***Cuadro 9.*** Concentración celular del crecimiento experimental con respecto a los nueve controles de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada (cél/mL).

| Controles | Inicio (cél/mL) | Final (cél/ mL) |
|---|---|---|
| AP1-6NJ | 26,667 ± 11547.20 | 57,778 ± 12619.80 |
| AP2-6NJ | 8,889 ± 1924.89 | 77,778 ± 3849.00 |
| AP3-6NJ | 22,233 ± 5084.62 | 276,666 ± 28479.68 |
| AP4-6NJ | 36,666 ± 5773.69 | 75,444 ± 22608.56 |
| AP5-6NJ | 28,889 ± 16777.41 | 123,333 ± 20275.87 |
| AP6-6NJ | 32,167 ± 7678.76 | 126,666 ± 8818.86 |
| AP7-6NJ | 83,333 ± 15275.25 | 115,556 ± 20367.00 |
| AP8-6NJ | 126,666 ± 6666.50 | 175,555 ± 18358.73 |
| AP9-6NJ | 111,111 ± 18953.76 | 170,000 ± 8818.86 |

Mediante una optimización estadística realizada en Minitab, se identificaron las condiciones óptimas de crecimiento de la cianobacteria *Arthrospira platensis*, las cuales resultaron fundamentales para el desarrollo del presente estudio y pueden visualizarse en la Figura 34. El análisis Taguchi permitió evaluar de manera simultánea el efecto de la dilución, inoculación, aireación y luminosidad, determinando la influencia individual de cada factor sobre la producción de biomasa.

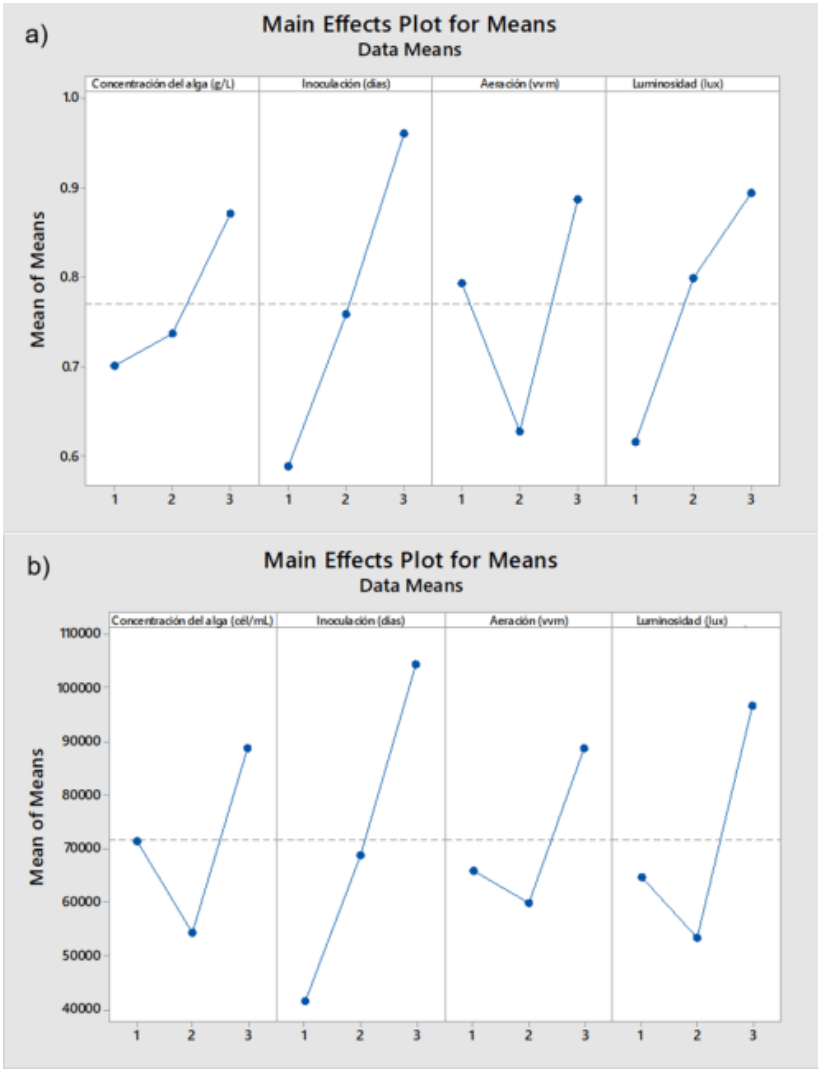


***Figura 34.*** Resultados de las condiciones óptimas Taguchi con respecto a los nueve controles de *Arthrospira platensis* con 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada. a) Crecimiento experimental (g/L) b) Crecimiento experimental (cél/mL).

El Cuadro 10 muestra la tabla de respuesta para la relación señal/ruido (S/N) del diseño Taguchi, calculada bajo el criterio “mayor es mejor”, con el objetivo de identificar los niveles óptimos de operación y la influencia relativa de cada factor sobre el crecimiento celular.

***Cuadro 10.*** Tabla de respuesta para la relación señal/ruido (S/N) del diseño experimental Taguchi.

| Nivel del parámetro | Concentración celular | Tiempo de inoculación | Tasa de aireación | Intensidad luminosa |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 100.80 | 98.01 | 101.26 | 101.12 |
| 2 | 100.48 | 102.04 | 100.56 | 100.38 |
| 3 | 104.68 | 105.90 | 104.14 | 104.46 |
| Δ | 4.21 | 7.89 | 3.58 | 4.09 |
| Rank | 2 | 1 | 4 | 3 |

Nota: Los valores de S/N fueron calculados bajo el criterio “mayor es mejor”.

Una vez determinadas las condiciones óptimas de crecimiento, se estableció un décimo control en medio Jourdan purificado, ajustando los cuatro parámetros a su nivel máximo (nivel 3), el cual se presenta en la Figura 15. Este control permitió contar con una referencia experimental para comparar el desempeño de los tratamientos desarrollados posteriormente en efluentes residuales de INTERNATIONAL.

Posteriormente, los estudios a nivel laboratorio de la cianobacteria como tratamiento de los efluentes residuales de INTERNATIONAL (Figuras 18–21) demostraron que *Arthrospira platensis* logró desarrollarse únicamente en dos de los cuatro efluentes evaluados: el efluente residual de Rechazo de Ultrafiltración y el efluente residual de Rechazo de Ósmosis. En ambos casos fue necesaria la adición de nutrientes Jourdan, los cuales aportaron fuentes de carbono y nitrógeno indispensables para sostener el crecimiento celular.

Este resultado coincide con estudios que señalan que, aun cuando algunas aguas residuales contienen nutrientes, su composición no siempre cubre los requerimientos metabólicos completos de la microalga, requiriendo suplementación para alcanzar productividades adecuadas.

Cabe mencionar que, en pruebas preliminares, el efluente residual de Irrigación clorada no fue considerado viable para el crecimiento de la cianobacteria, principalmente debido a su alto contenido de cloro. La presencia de agentes oxidantes como el cloro libre puede generar estrés celular, inhibición fotosintética e incluso lisis, afectando severamente la viabilidad del cultivo microalgal. Por otra parte, aunque el efluente de Rechazo de Ultrafiltración resultó funcional, la empresa INTERNATIONAL no disponía del mismo en el momento experimental, motivo por el cual el efluente de Rechazo de Ósmosis fue seleccionado como materia prima principal para el estudio.

Lo anterior condujo al diseño de cuatro tratamientos experimentales (Figura 16 y Figuras 22–24). El primero (AP-6NJ) consistió en el cultivo de la cianobacteria en agua purificada enriquecida con seis nutrientes Jourdan y esterilización por ozono, funcionando como tratamiento control. El segundo (AR-O) correspondió al cultivo directo en el efluente sin suplementación. El tercero (AR-O-2NJ) incluyó el efluente enriquecido únicamente con bicarbonato y nitrato de sodio, considerando que el efluente de ósmosis inversa ya presenta altas concentraciones de cloruro de sodio. Finalmente, el cuarto tratamiento (AR-O-6NJ) consistió en el enriquecimiento completo con seis nutrientes Jourdan.

Los resultados indicaron que el tratamiento AR-O constituyó un caso atípico, al presentar valores considerablemente inferiores respecto a los demás, con una similitud menor al 10 % y diferencias superiores al 900 %, lo que sugiere un efecto nulo o muy limitado sobre el crecimiento celular. Este comportamiento evidencia que, aunque el efluente contiene sales disueltas, carece de nutrientes

esenciales en concentraciones suficientes para sostener la actividad metabólica de la cianobacteria.

En contraste, los tratamientos AP-6NJ, AR-O-2NJ y AR-O-6NJ mostraron comportamientos comparables. AP-6NJ y AR-O-2NJ alcanzaron una similitud del 94 %, evidenciando un crecimiento prácticamente equivalente, lo que sugiere que la suplementación parcial del efluente puede aproximar su desempeño al de un medio sintético completo. Por su parte, AR-O-2NJ y AR-O-6NJ presentaron una similitud del 71 %, mientras que AR-O-6NJ generó el mayor crecimiento celular global. No obstante, sus resultados no difirieron de forma drástica respecto a los otros tratamientos enriquecidos. La similitud entre AP-6NJ y AR-O-6NJ fue del 64 %, y AR-O-6NJ superó a AR-O-2NJ en aproximadamente un 29 %. Con base en estos resultados, el orden de efectividad fue:

AR-O-6NJ > AR-O-2NJ > AP-6NJ > AR-O

Este comportamiento sugiere que el enriquecimiento nutricional completo del efluente potencia la productividad celular, aunque la suplementación parcial ya permite alcanzar rendimientos cercanos al control, lo cual tiene implicaciones importantes en términos de costos operativos y viabilidad de escalamiento.

La concentración celular de *Arthrospira platensis*, expresada tanto en gramos por litro como en células por mililitro, constituye un indicador clave del desempeño del cultivo, ya que refleja de manera directa la capacidad del sistema para generar biomasa y, simultáneamente, remover nutrientes del efluente tratado.

En este sentido, los gráficos de concentración celular permiten evaluar la eficiencia de cada tratamiento desde una perspectiva tanto ambiental como biotecnológica, tal como ha sido documentado ampliamente en sistemas de cultivo de esta cianobacteria (Vonshak, 1997; Richmond, 2004).

Los gráficos parámetro–tiempo presentados en las Figuras 35 y 36 mostraron que el crecimiento celular en el tratamiento AR-O-6NJ, correspondiente al efluente residual de Rechazo de Ósmosis suplementado con los seis nutrientes del medio Jourdan, fue 35.8 % superior al del tratamiento control AP-6NJ (agua purificada suplementada con los seis nutrientes del medio Jourdan) y 28.66 % mayor respecto al tratamiento AR-O-2NJ, suplementado con dos nutrientes del mismo medio. En contraste, no se observó crecimiento celular en el tratamiento AR-O, el cual no recibió suplementación nutrimental.

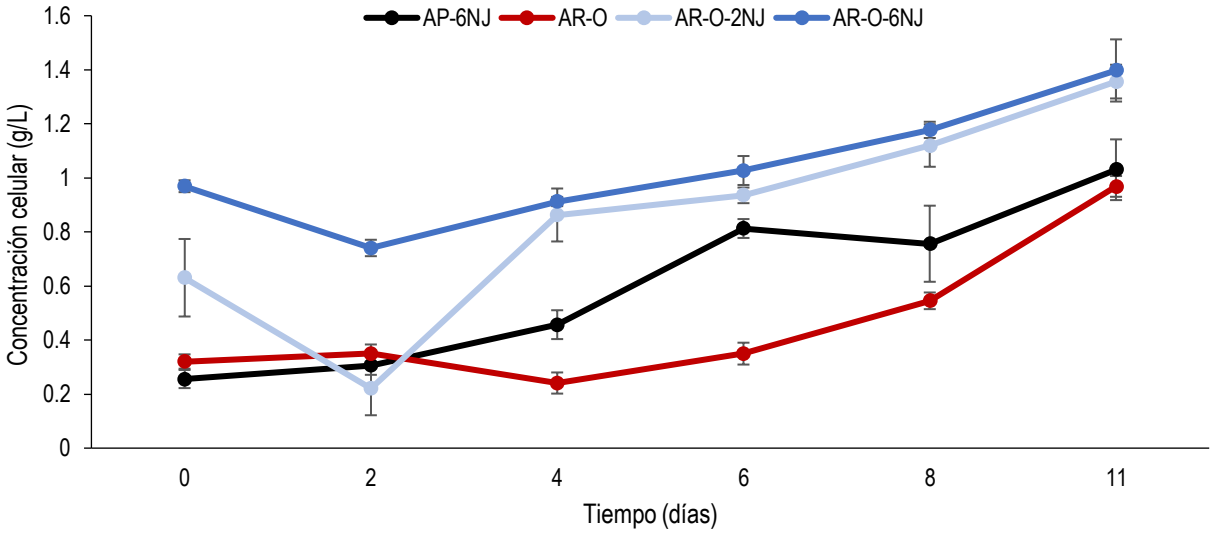


***Figura 35.*** Concentración celular del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (g/L).

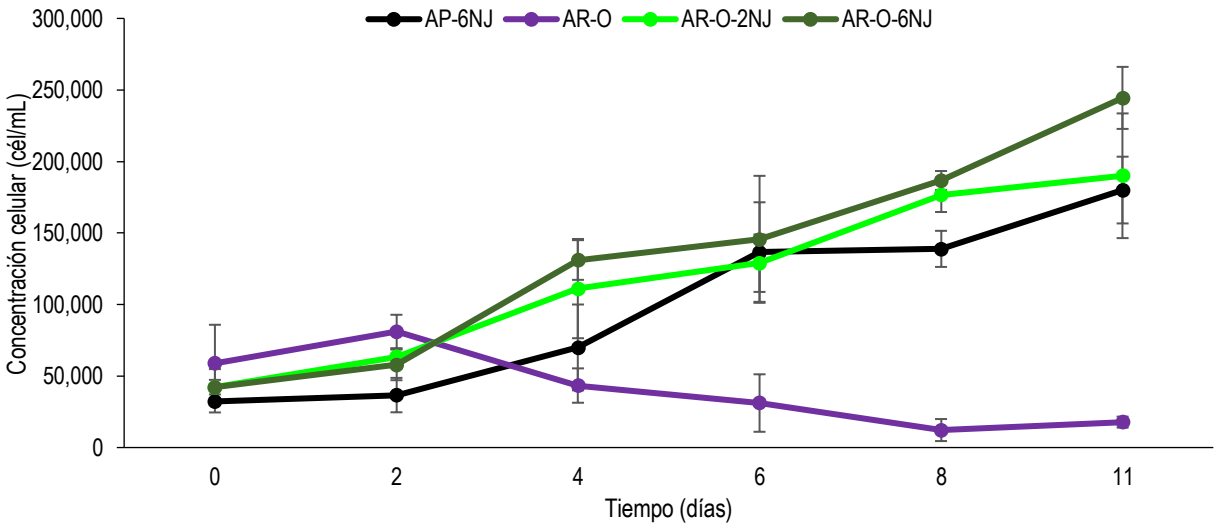


***Figura 36.*** Concentración celular del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (cél/mL).

Con la finalidad de validar estadísticamente las diferencias observadas entre tratamientos, se realizó una prueba de comparación de medias mediante el método de Tukey, cuyos resultados se presentan en la Figura 37. El análisis confirmó que no existen diferencias significativas entre los tratamientos suplementados con nutrientes (AP-6NJ, AR-O-2NJ y AR-O-6NJ), lo que indica que, desde el punto de vista estadístico, sus desempeños pueden considerarse equivalentes dentro del nivel de confianza evaluado. No obstante, de manera descriptiva, AR-O-6NJ presentó los valores promedio más altos de crecimiento celular, consolidándose como el tratamiento con mayor productividad de biomasa bajo las condiciones experimentales estudiadas.

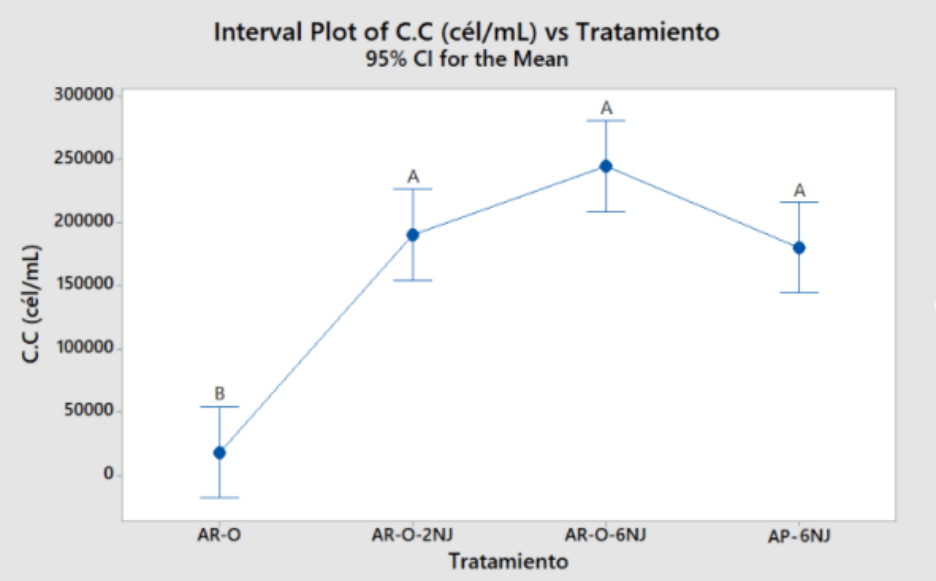


***Figura 37.*** Resultados por diferencia de medias Tukey con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis.

### 7.2.2 Oxígeno Disuelto

Más adelante, en la Figura 38, se observa el comportamiento del oxígeno disuelto (OD) en los cuatro tratamientos evaluados. De manera general, los resultados mostraron que el OD se mantuvo relativamente estable a lo largo del periodo experimental, con variaciones moderadas entre los valores iniciales y finales, lo que sugiere que los sistemas microalgales conservaron condiciones aerobias funcionales durante todo el tiempo de cultivo.

El tratamiento AP-6NJ presentó un comportamiento prácticamente constante, con una ligera disminución del 1.52 %, mientras que AR-O mostró un incremento del 19.64 %. Por su parte, los tratamientos AR-O-2NJ y AR-O-6NJ registraron disminuciones del 11.11 % y 11.43 %, respectivamente.

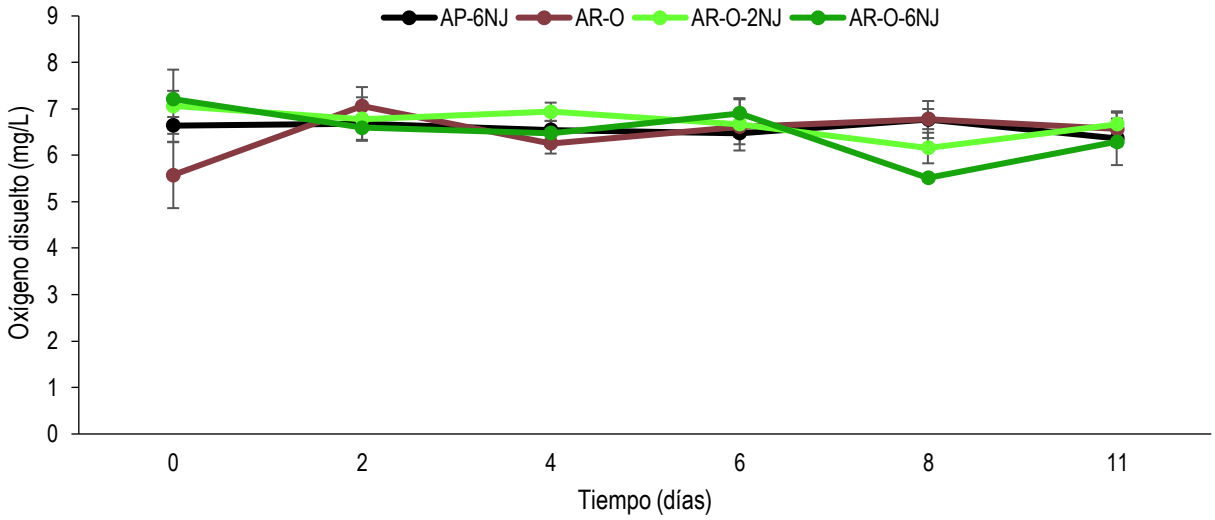


***Figura 38.*** Oxígeno disuelto/OD del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mg/L).

### 7.2.3 pH, Temperatura, Potencial Óxido Reducción, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Salinidad

Como es sabido, *Arthrospira platensis*, comúnmente conocida como Espirulina, es una cianobacteria (clasificada como microalga) que prospera en ambientes alcalinos. Sus rangos de tolerancia al pH son relativamente amplios, aunque presenta un intervalo óptimo bien definido. De manera general, se reporta un rango mínimo tolerado cercano a pH 8.5, un rango óptimo de crecimiento entre pH 9.0 y 10.5, y un rango máximo tolerado aproximado de pH 11.0–11.5. Aunque puede sobrevivir cerca de pH 8.5, su crecimiento se ve significativamente reducido por debajo de pH 9. En condiciones de laboratorio y cultivo industrial, el pH suele mantenerse entre 9.5 y 10.5 para maximizar la productividad, mientras que valores superiores a pH 11.5 pueden provocar daño en estructuras celulares y enzimas, reduciendo el crecimiento o incluso ocasionando la muerte celular (Mahmoud et al., 2016).

En la Figura 39 se observa el comportamiento del pH durante la Fase I para los distintos tratamientos evaluados.

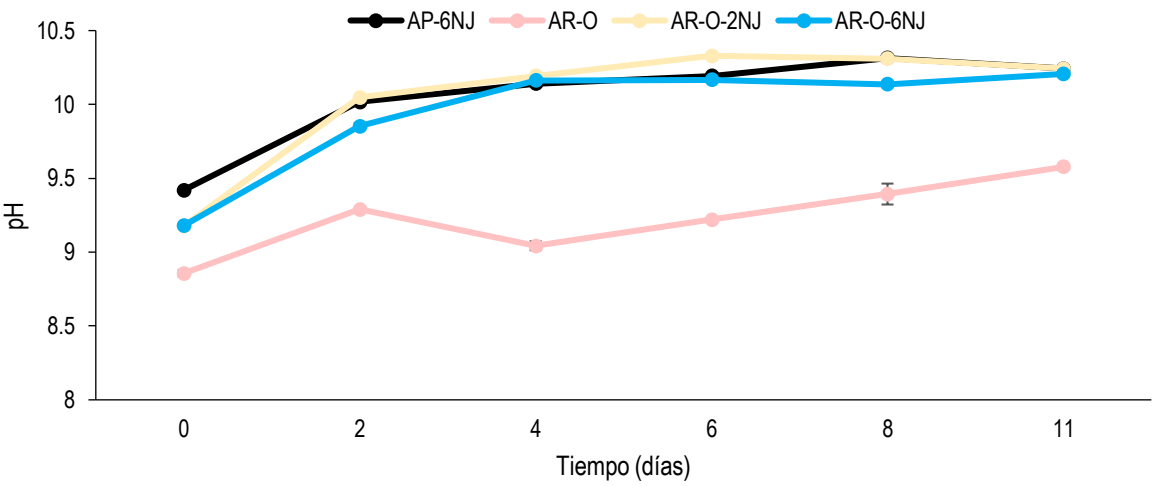


***Figura 39.*** pH del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis.

En el caso de la temperatura, los cuatro tratamientos presentaron un incremento aproximado de 5 °C a lo largo del periodo experimental (Figura 40). Este comportamiento se atribuye a condiciones ambientales del laboratorio y a la radiación lumínica constante, factores que influyen directamente cuando la temperatura es monitoreada pero no controlada (Richmond, 2004).

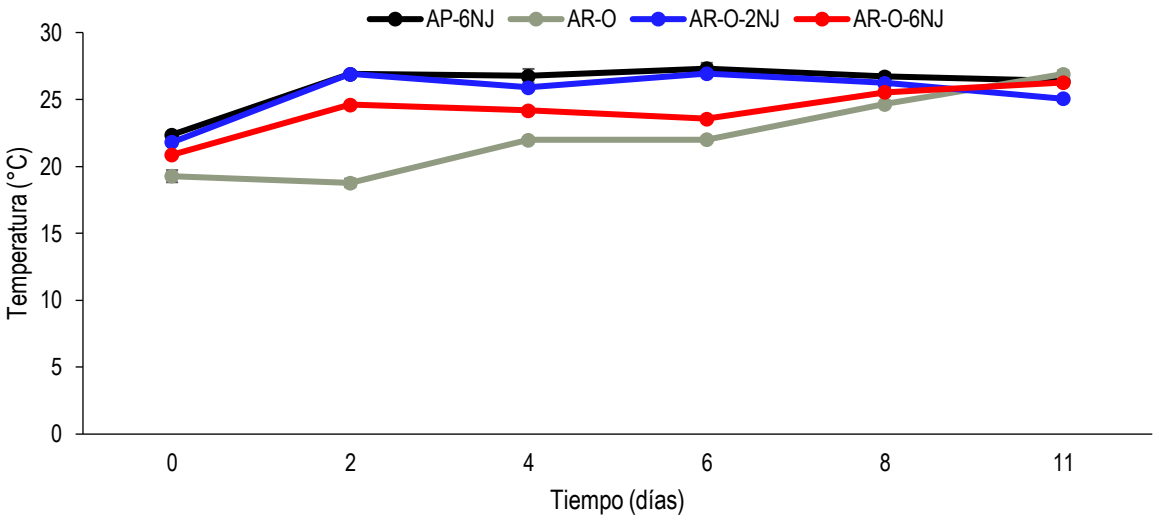


***Figura 40.*** Temperatura del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (°C).

El ORP permite evaluar el estado oxidante o reductor del sistema y funciona como indicador indirecto de la actividad metabólica global, al responder al oxígeno disuelto, actividad microbiana y procesos bioquímicos del tratamiento (Metcalf & Eddy, 2014).

En la Figura 41 se muestra una disminución del ORP en todos los tratamientos:

AP-6NJ: −18.18 %
AR-O: −20 %
AR-O-2NJ: −34.62 %
AR-O-6NJ: −41.38 %

Esta tendencia hacia condiciones más reductoras se asocia al incremento de biomasa, respiración celular y degradación de materia orgánica, procesos característicos de sistemas biológicos activos (Markou & Georgakakis, 2011; Park et al., 2011).

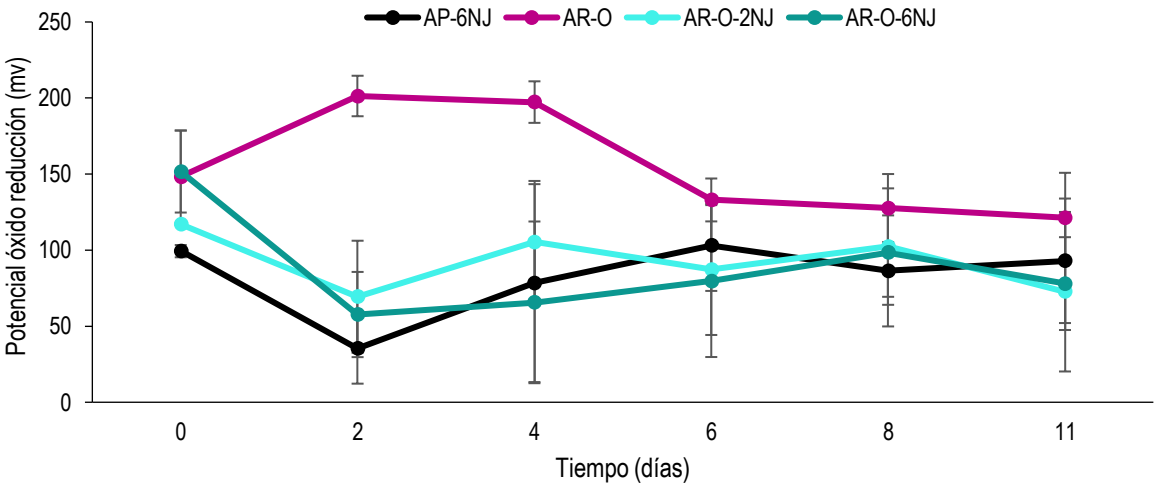


***Figura 41.*** Potencial óxido reducción/ORP del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mv).

En las Figuras 42–44 se observó un comportamiento similar para los tres parámetros, con incrementos de:

AP-6NJ: 9.09 %
AR-O: 10 %
AR-O-2NJ: 7.96 %
AR-O-6NJ: 12 %

Esto es esperable, ya que los tres expresan la concentración de sales disueltas mediante distintos principios de medición (APHA, 2017).

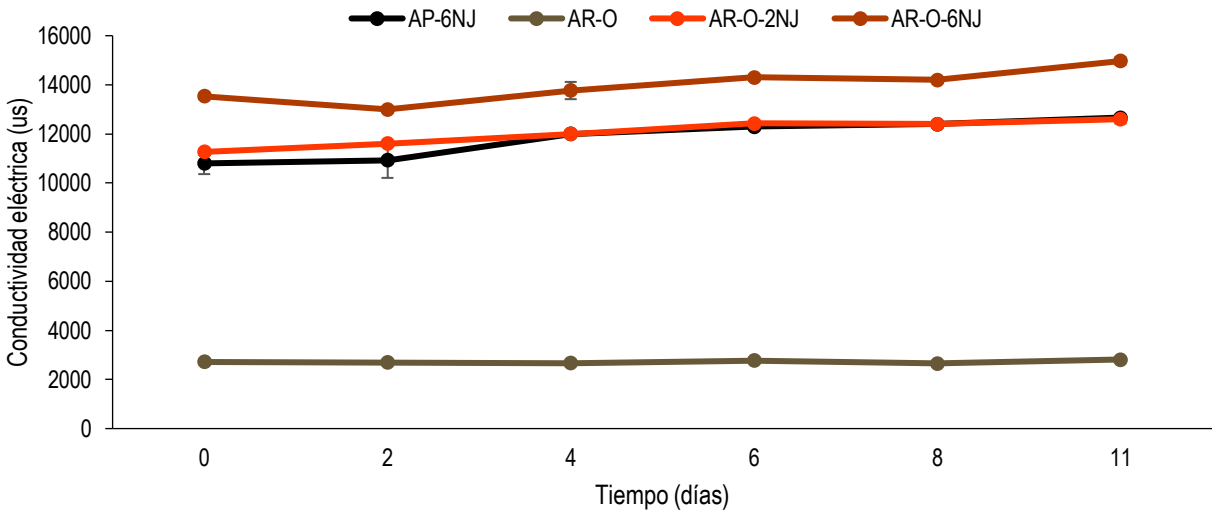


***Figura 42.*** Conductividad eléctrica/EC del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (us).

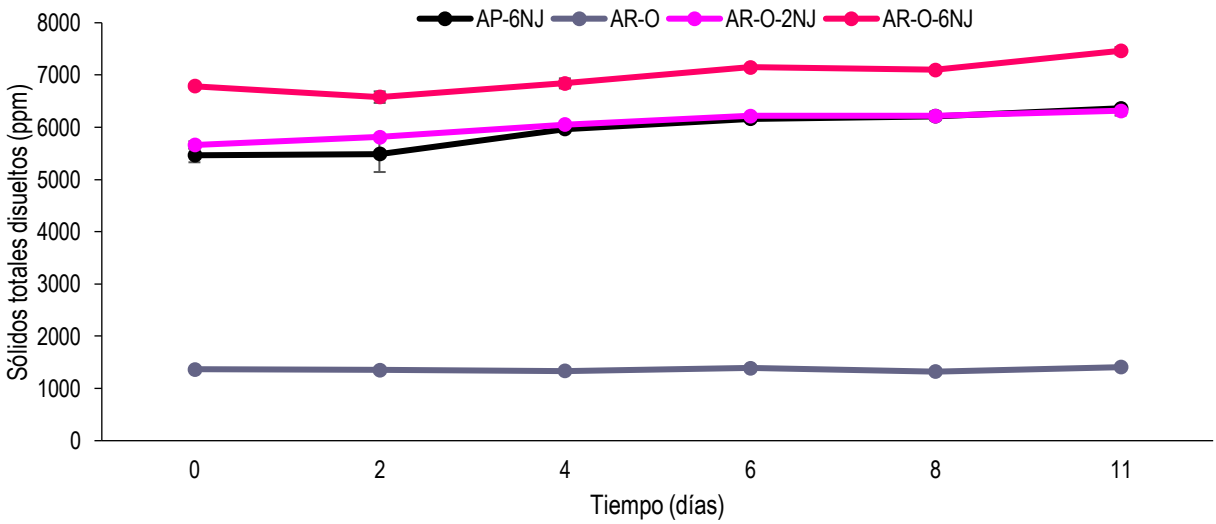


***Figura 43.*** Sólidos totales disueltos/TDS del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (ppm).

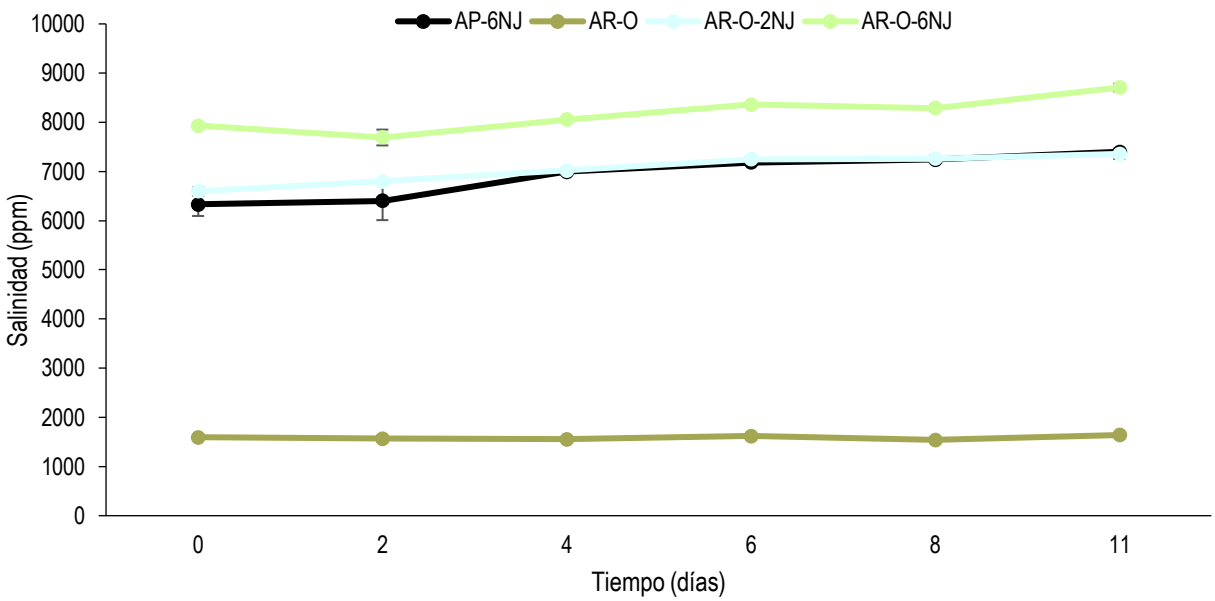


***Figura 44.*** Salinidad/SALT del crecimiento experimental con respecto a los cuatro tratamientos de *Arthrospira platensis* con 2/6, 6/6 y sin nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (ppm).

### 7.2.4 Demanda Química de Oxígeno

Como es sabido, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro ampliamente utilizado para estimar la carga de materia orgánica presente en efluentes residuales, ya que representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente los compuestos orgánicos susceptibles de degradación. Este parámetro se determina comúnmente mediante el método de dicromato en medio ácido, de acuerdo con los procedimientos estandarizados por la American Public Health Association (APHA, 2017). Es importante señalar que la DQO puede evaluarse bajo dos enfoques distintos: DQO total y DQO soluble, cuya diferencia radica en el tratamiento previo de la muestra. La DQO total incluye tanto la fracción particulada como la disuelta de la materia orgánica, mientras que la DQO soluble se determina tras la eliminación de sólidos suspendidos mediante centrifugación y/o filtración, representando únicamente el carbono orgánico disuelto presente en la muestra (Metcalf & Eddy, 2014).

En la presente investigación, la determinación de la DQO se realizó sobre muestras previamente centrifugadas y filtradas a través de filtros de 0.45 µm, siguiendo el método colorimétrico de reflujo cerrado descrito por APHA (2017). En consecuencia, los valores obtenidos corresponden exclusivamente a la DQO soluble, por lo que reflejan la dinámica de la materia orgánica disuelta en el sistema y no la carga orgánica total del efluente tratado.

Los resultados obtenidos (Figura 45) mostraron un incremento de la DQO soluble en los tratamientos AP-6NJ y AR-O-6NJ, con aumentos de 84.4 % y 58.49 %, respectivamente, mientras que el tratamiento AR-O-2NJ presentó un incremento mínimo del 1.85 %.

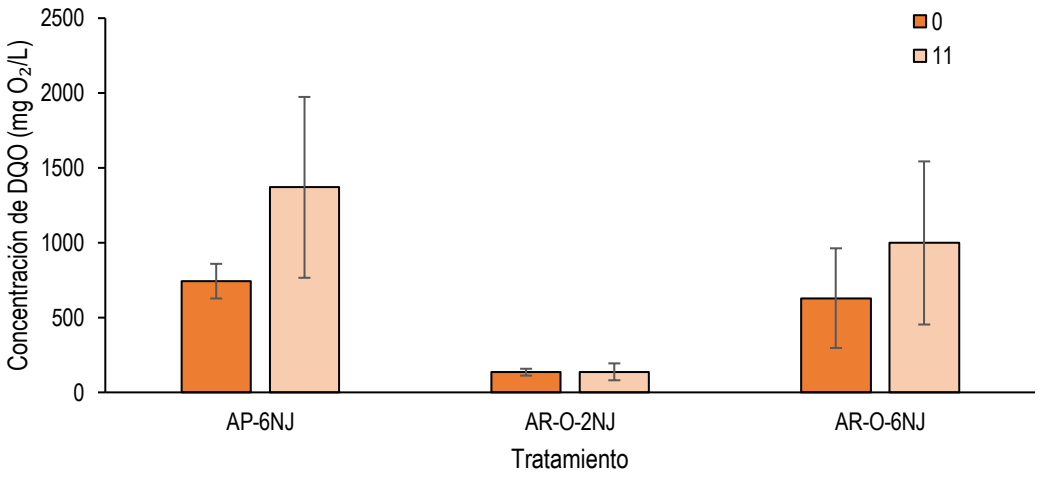


***Figura 45.*** Concentración de DQO con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mg $O_2$/L).

### 7.2.5 Amonio

El amonio es una de las principales formas de nitrógeno inorgánico presentes en efluentes residuales y representa un parámetro clave para evaluar la eficiencia de los sistemas biológicos de tratamiento, debido a su alta biodisponibilidad y a su potencial impacto ambiental.

En sistemas microalgales, el comportamiento del amonio no se limita únicamente a procesos de remoción, sino que también está asociado a dinámicas metabólicas internas relacionadas con la asimilación, transformación y liberación de nitrógeno por parte de la biomasa (Metcalf & Eddy, 2014). Los resultados obtenidos en la Figura 46, correspondientes al amonio, mostraron comportamientos contrastantes entre los tratamientos evaluados durante la Fase I. El tratamiento control AP-6NJ presentó una disminución de la concentración de amonio del 64.4 %, mientras que el tratamiento AR-O-2NJ mostró una reducción aún mayor, del 80.15 %. En contraste, el tratamiento AR-O-6NJ presentó un incremento del amonio del 181.4 % al final del periodo experimental.

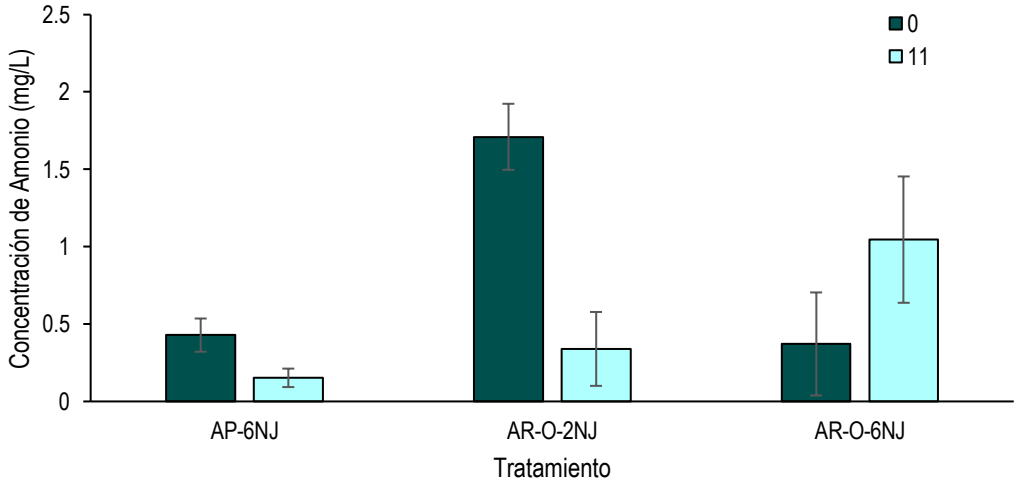


***Figura 46.*** Concentración de Amonio con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mg/L).

### 7.2.6 Ortofosfatos

El ortofosfato representa la forma inorgánica más biodisponible del fósforo en efluentes residuales y constituye un parámetro relevante para evaluar la eficiencia de sistemas biológicos de tratamiento, particularmente aquellos basados en microalgas.

En sistemas microalgales, el fósforo es un nutriente esencial involucrado en procesos metabólicos fundamentales como la síntesis de ATP, fosfolípidos y ácidos nucleicos; sin embargo, su comportamiento en el medio puede variar en función de la disponibilidad de otros nutrientes, de la composición del agua y de las condiciones fisicoquímicas del sistema (Metcalf & Eddy, 2014; Markou & Georgakakis, 2011).

Los resultados obtenidos en la Figura 47 mostraron comportamientos contrastantes entre los tratamientos evaluados durante la Fase I. El tratamiento control AP-6NJ presentó una disminución de la concentración de ortofosfatos del 8.43 % desde el inicio hasta el final del experimento. En contraste, el tratamiento AR-O-2NJ mostró un incremento del 12.2 %, mientras que el tratamiento AR-O-6NJ presentó un aumento considerable del 116.2 %.

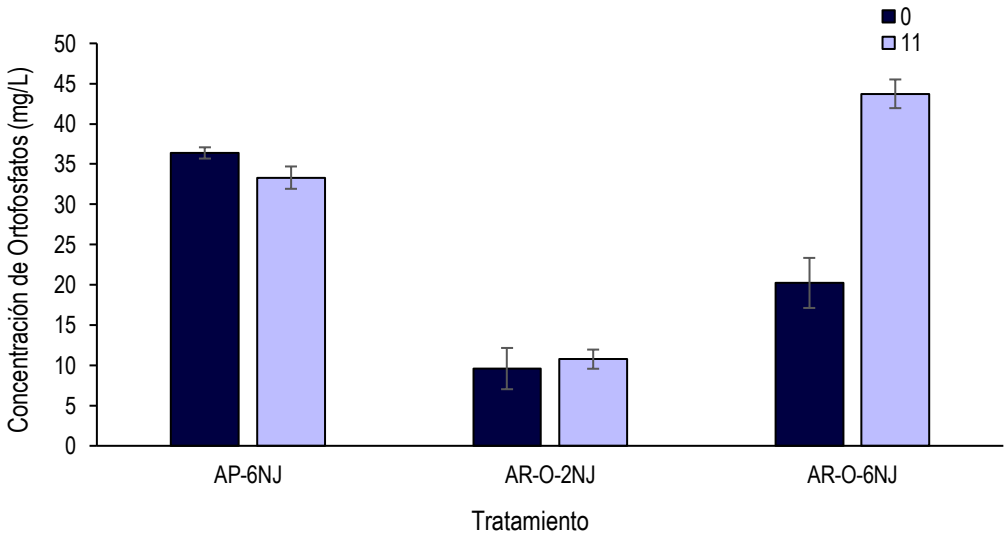


***Figura 47.*** Concentración de Ortofosfatos con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (mg/L).

## 7.3 Análisis Bioquímicos *de Biomasa de A. platensis*

### 7.3.1 Lípidos

El contenido de lípidos en la biomasa microalgal constituye un parámetro relevante para evaluar no solo el estado metabólico de los organismos, sino también el potencial de valorización biotecnológica de la biomasa generada durante procesos de tratamiento de aguas residuales.

A diferencia de los análisis fisicoquímicos realizados sobre el efluente, la cuantificación de lípidos se llevó a cabo a partir de biomasa liofilizada, triturada y seca obtenida de los tratamientos AP-6NJ, AR-O-2NJ y AR-O-6NJ, por lo que los resultados reflejan directamente la respuesta metabólica de *Arthrospira platensis* bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Los resultados obtenidos en la Figura 48 mostraron diferencias claras en el contenido lipídico de la biomasa entre los tratamientos. El tratamiento AR-O-2NJ presentó la mayor concentración de lípidos, seguido del tratamiento control AP-6NJ, mientras que AR-O-6NJ registró el valor más bajo.

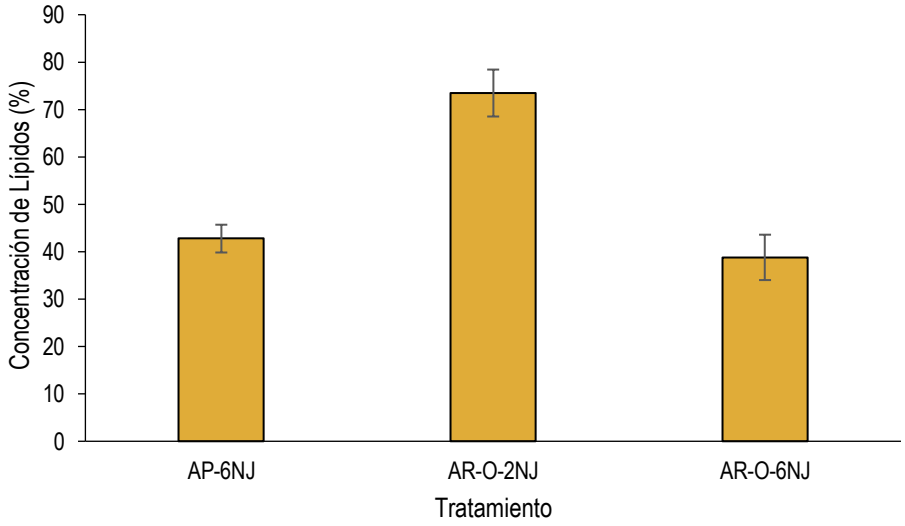


***Figura 48.*** Concentración de Lípidos con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis (%).

### 7.3.2 Ficocianina

La ficocianina es una ficobiliproteína característica de *Arthrospira platensis* y otras cianobacterias, ampliamente valorada por sus propiedades antioxidantes y su potencial aplicación en las industrias alimentaria, farmacéutica y biotecnológica. Su cuantificación, al igual que la de los lípidos, se realizó a partir de biomasa microalgal previamente cosechada, seca y procesada, por lo que los resultados obtenidos reflejan directamente la respuesta metabólica de la cianobacteria bajo las condiciones experimentales evaluadas (Bennett & Bogorad, 1973).

Los resultados correspondientes a la Figura 49 mostraron diferencias claras en la concentración, pureza y rendimiento de ficocianina entre los tratamientos evaluados. El tratamiento AR-O-2NJ presentó los valores más elevados en términos de concentración y rendimiento, además de una pureza superior respecto a los demás tratamientos, seguido del tratamiento control AP-6NJ, mientras que AR-O-6NJ registró los valores más bajos de forma general.

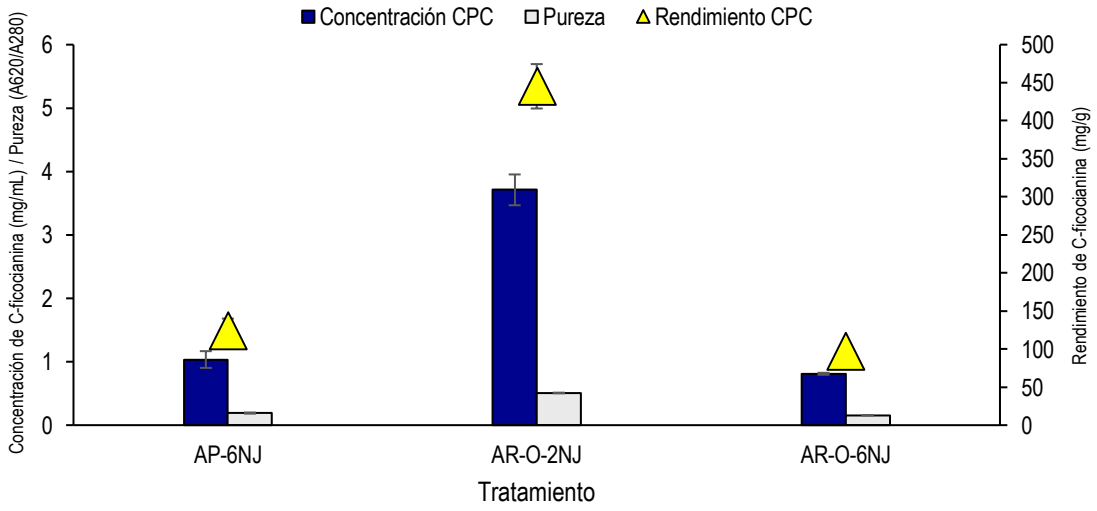


***Figura 49.*** Concentración de Ficocianina con respecto a los tres tratamientos funcionales de *Arthrospira platensis* con 2/6 y 6/6 nutrientes Jourdan en agua purificada y agua residual de Rechazo de Ósmosis.

Posteriormente, en los Cuadros 11 y 12 se presenta la interpretación integral de los resultados obtenidos durante la Fase I. Entre los parámetros analizados se incluyen la concentración celular de cada tratamiento, así como los análisis multiparamétricos, fisicoquímicos y bioquímicos, entre otros indicadores de desempeño del sistema.

***Cuadro 11.*** Análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir del tratamiento de las muestras experimentales con cianobacterias *A. platensis*.

| **Muestra (C/T – *A. p*)** | **Conc. celular (cél/mL)** | **Oxígeno disuelto (± %)** | **P. multi (± %)** | **P. fisicoq. (± %)** | **Desempeño global** |
|---|---|---|---|---|---|
| AP-6NJ | 180,000 (alta) | Moderado OD: -1.52 | Buenos pH: +8.72 ORP: -18.18 SALT: +9.09 | Moderados DQO: +84.4 $N–NH_4^+$: -64.4 $P–PO_4^{3-}$: -8.43 | Moderado y equilibrado |
| AR-O | 17,778 (más baja) | Muy malo OD: +19.64 | Malos pH: +8.14 ORP: -20 SALT: +10 | No cumple con el criterio: DQO, N-$NH_4^+$ y P-$PO_4^{3-}$ | No favorable (Disfuncional) |
| AR-O-2NJ | 190,000 (alta) | Muy bueno OD: -11.11 | Muy buenos pH: +11.66 ORP: -34.62 SALT: +7.96 | Buenos DQO: +1.85 $N–NH_4^+$: -80.15 $P–PO_4^{3-}$: +12.2 | Favorable |
| AR-O-6NJ | 244,444 (más alta) | Muy bueno OD: -11.43 | Buenos pH: +11.11 ORP: -41.38 SALT: +12 | Malos DQO: +58.49 $N–NH_4^+$: +181.4 $P–PO_4^{3-}$: +116.2 | Limitado pero funcional |

***Cuadro 12.*** Análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir de la biomasa microalgal postratada con cianobacterias *A. platensis*.

| **Muestra (C/T – *A. p*)** | **Color (biomasa)** | **Lípidos (%)** | **Ficocianina (CPC)** | **Desempeño global** |
|---|---|---|---|---|
| AP-6NJ | Verde (opaco) | Bueno 42.76 | Buena Conc.: 1.03 Pur.: 1.90 Rend.: 124.21 | Favorable |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| AR-O-2NJ | Verde oscuro (intenso) | Muy bueno 73.47 | Muy buena Conc.: 3.71 Pur.: 5.07 Rend.: 445.28 | Muy favorable |
| AR-O-6NJ | Verde (brillante) | Bueno 38.79 | Normal Conc.: 0.81 Pur.: 1.57 Rend.: 97.22 | Aceptable |

### 7.4 Biocarbón

En la Figura 50 se puede observar que, posterior a una prueba preliminar de pirólisis utilizando Espirulina comercial como sustrato, se obtuvo un biocarbón con morfología granular.

Por el contrario, la prueba de pirólisis realizada con biomasa microalgal postratada del tratamiento AR-O-2NJ como sustrato dio como resultado un biocarbón de tamaño de partícula considerablemente menor, con apariencia pulverulenta y ausencia de estructura granular definida.

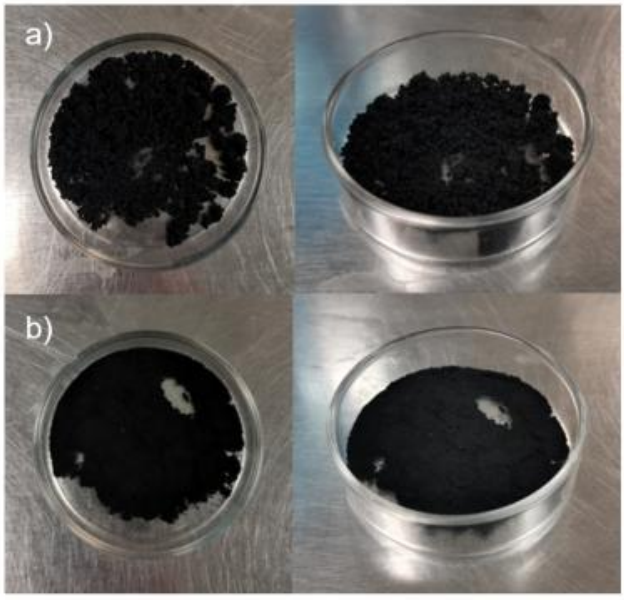


***Figura 50.*** Obtención de biocarbón a partir de *A. platensis*. a) Biocarbón de Espirulina comercial b) Biocarbón de biomasa microalgal postratada (AR-O-2NJ).

En los siguientes Cuadros 13 y 14, se podrán observar los resultados generales del proceso de producción de biocarbón, a partir de biomasa de microalgas.

***Cuadro 13.*** Resultados fisicoquímicos y operativos del biocarbón obtenido a partir de la biomasa de *Arthrospira platensis* (AR-O-2NJ).

| Parámetro | Resultado | Tipo de dato | Interpretación |
|---|---|---|---|
| Sustrato | Biomasa microalgal postratada (AR-O-2NJ) | Cualitativo | Seleccionado por mejor desempeño en Fase I |
| Activación química | $H_3PO_4$ (85%) | Cualitativo | Favorece formación de estructura porosa |
| Relación impregnación | 5 g biomasa : 2.97 mL $H_3PO_4$ | Cuantitativo | Adecuada para activación |
| Temperatura máxima | 450 °C | Cuantitativo | Rango óptimo para carbonización |
| Tiempo de residencia | 60 min | Cuantitativo | Permite formación estructural |
| Tiempo total del proceso | ~329 min | Cuantitativo | Incluye calentamiento y enfriamiento |
| Atmósfera | $N_2$ (inerte) | Cualitativo | Evita oxidación |
| Rendimiento | 66.92 % | Cuantitativo | Alto rendimiento (rango superior reportado) |
| Morfología | Pulverulenta, fina | Cualitativo | Mayor área superficial aparente |
| Comparación con espirulina comercial | Menor tamaño de partícula | Cualitativo | Indica mayor fragmentación estructural |
| pH inicial (post-pirólisis) | 1–2 | Cuantitativo | Alta acidez por $H_3PO_4$ |
| pH post-lavado alcalino | 11–13 | Cuantitativo | Neutralización de grupos ácidos |
| pH final ajustado | 6–8 | Cuantitativo | Apto para aplicaciones ambientales |
| Área superficial | No determinada | Limitación | Requiere análisis BET |
| Contenido de cenizas | No determinado | Limitación | Falta caracterización |
| Potencial de aplicación | Adsorbente / enmienda | Cualitativo | Basado en morfología |

***Cuadro 14.*** Resumen de resultados clave del biocarbón obtenido a partir de la biomasa microalgal postratada con cianobacterias *A. platensis*.

| Parámetro | Resultado clave |
|---|---|
| Sustrato | Biomasa AR-O-2NJ |
| Proceso | Activación con $H_3PO_4$ + pirólisis (450 °C) |
| Rendimiento | 66.92 % |
| Morfología | Pulverulenta (alta área aparente) |
| Aplicación potencial | Adsorbente / valorización |

### 7.5 Materia Prima de la Fase II

El lodo anaerobio (LA), también denominado lodo activado anaerobio, es un tipo de biomasa caracterizada por contener comunidades microbianas anaerobias capaces de degradar materia orgánica en ausencia de oxígeno. En el presente estudio, se empleó LA proveniente de la industria cervecera, seleccionado debido a su alta actividad biológica y a su eficacia demostrada en procesos de digestión anaerobia.

Es importante considerar que el aporte del LA puede evaluarse mediante dos enfoques metodológicos: (i) sumando los valores obtenidos en la caracterización del inóculo a las muestras iniciales, o (ii) restando dichos valores de los resultados finales del proceso. En esta investigación se optó por la segunda alternativa, ya que permite reflejar con mayor claridad la influencia real del inóculo tanto en los controles como en los tratamientos posteriores al proceso de codigestión.

### 7.6 Medición de la Producción de Biogás (Metano)

El sistema de probeta invertida empleado resultó eficaz para la medición diaria de la producción de metano; sin embargo, se identificaron aspectos técnicos relevantes para su correcto funcionamiento. Por ejemplo, el uso de probetas con capacidad menor a 250 mL puede generar lecturas imprecisas debido a la rápida saturación del volumen medido, mientras que volúmenes excesivamente grandes pueden propiciar la formación de vacío por efecto de la

presión interna del gas acumulado.

Cuando el biogás se produce de manera regular en procesos de digestión anaerobia, su composición típica corresponde aproximadamente a 60 % de metano ($CH_4$) y entre 35–40 % de dióxido de carbono ($CO_2$), por lo que se considera que el metano constituye su principal fracción energética. Asimismo, pueden encontrarse otros gases en menores proporciones, tales como óxidos de nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, etano y propano, cuya presencia puede influir en la calidad del biogás y en su aprovechamiento energético. Por ello, resulta recomendable realizar procesos de caracterización y purificación para garantizar un uso seguro y eficiente, siendo la cromatografía de gases una de las técnicas más empleadas para este fin (Carrillo et al., 2019; Gencat, 2009).

En el presente estudio, la purificación del biogás se llevó a cabo mediante una columna de absorción química, empleando hidróxido de sodio (NaOH) al 2 %. Este reactivo reaccionó con el dióxido de carbono ($CO_2$) contenido en el biogás, formando bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$), lo que permitió retener el $CO_2$ y obtener un gas compuesto mayoritariamente por metano ($CH_4$).

Durante el periodo experimental, los reactores generaron diferentes volúmenes de metano en función de la composición del sustrato y de la cantidad de lodo anaerobio (LA) adicionada. Las Figuras 51–55 presentan el comportamiento acumulado de metano de los controles y tratamientos durante los 21 días de ensayo, así como su ajuste al modelo de Gompertz modificado, el cual permitió estimar parámetros cinéticos fundamentales del proceso: la producción máxima de metano (Hmax), la velocidad máxima de producción (Rmax) y la fase de latencia (λ). Estos parámetros permiten interpretar la dinámica de la digestión anaerobia, donde Hmax representa la capacidad total de generación de metano, Rmax la rapidez del proceso y λ el tiempo de adaptación microbiana al sustrato.

Con el fin de estandarizar la comparación entre tratamientos y cumplir con los criterios comúnmente empleados en digestión anaerobia, la producción acumulada de metano también fue expresada como rendimiento específico normalizado en función de los sólidos volátiles (Sv), reportándose en mL $CH_4$/g Sv añadido y mL $CH_4$/g Sv removido. Esta normalización permitió comparar la eficiencia real de conversión del sustrato entre sistemas, independientemente del volumen absoluto generado, relacionando directamente la producción de metano con la fracción orgánica biodegradable disponible en cada reactor.

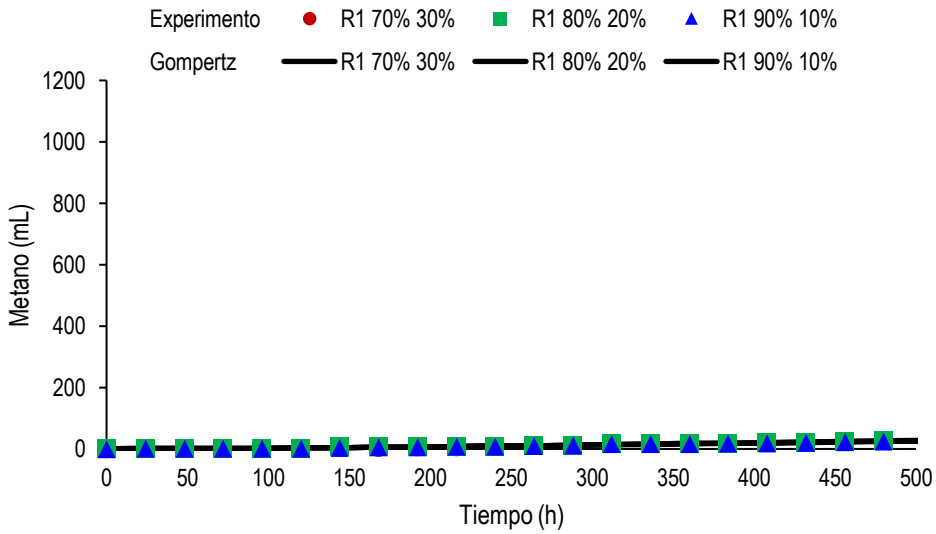


***Figura 51.*** Producción acumulada de metano (mL/h) del control 100:0, correspondiente al residuo n.º 1 (lodos).

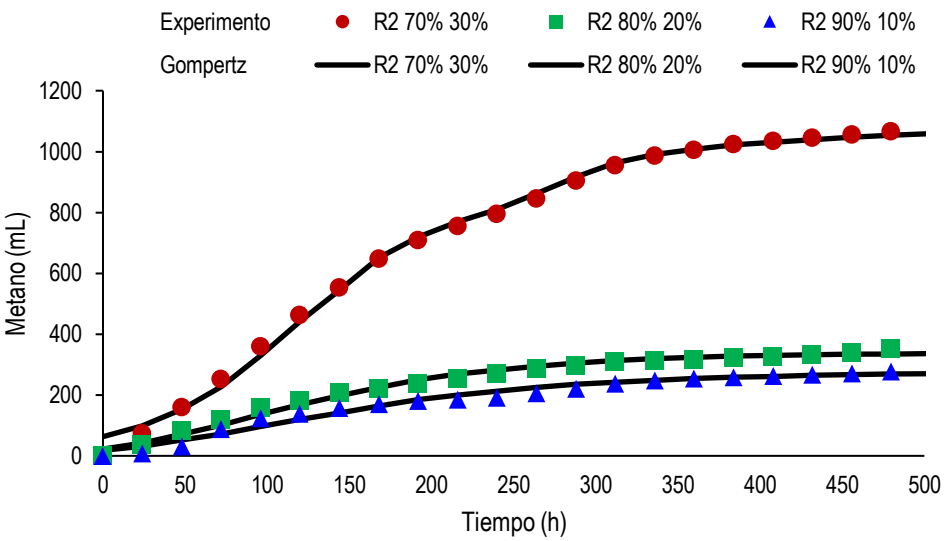


***Figura 52.*** Producción acumulada de metano (mL/h) del control 0:100, correspondiente al residuo n.º 2 (alimentos).

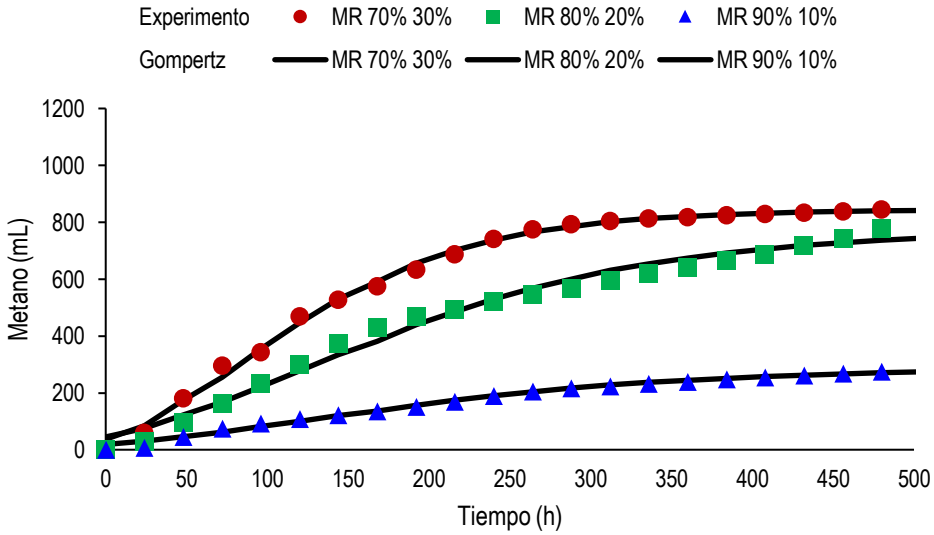


***Figura 53.*** Producción acumulada de metano (mL/h) del tratamiento 25:75, correspondiente a residuos n.º 1 y n.º 2 (mezcla).

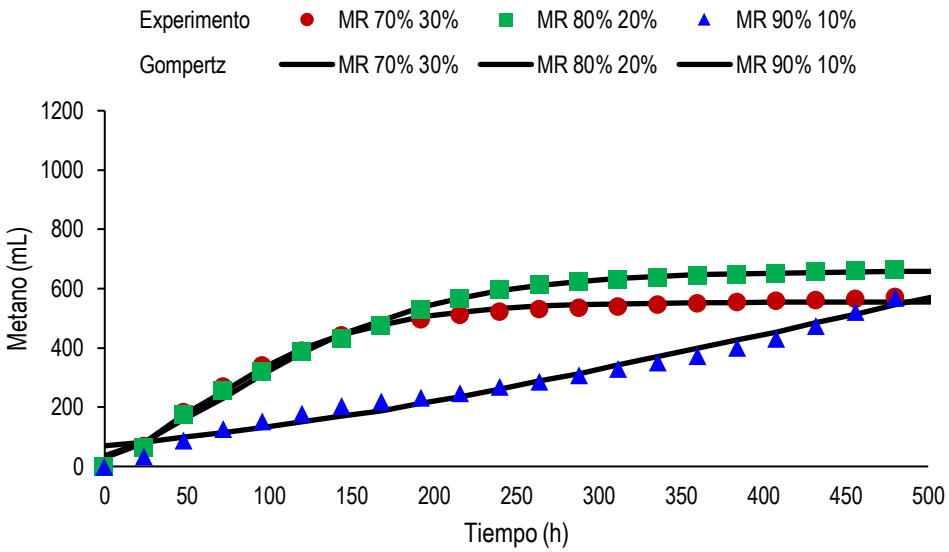


***Figura 54.*** Producción acumulada de metano (mL/h) del tratamiento 50:50, correspondiente a residuos n.º 1 y n.º 2 (mezcla).

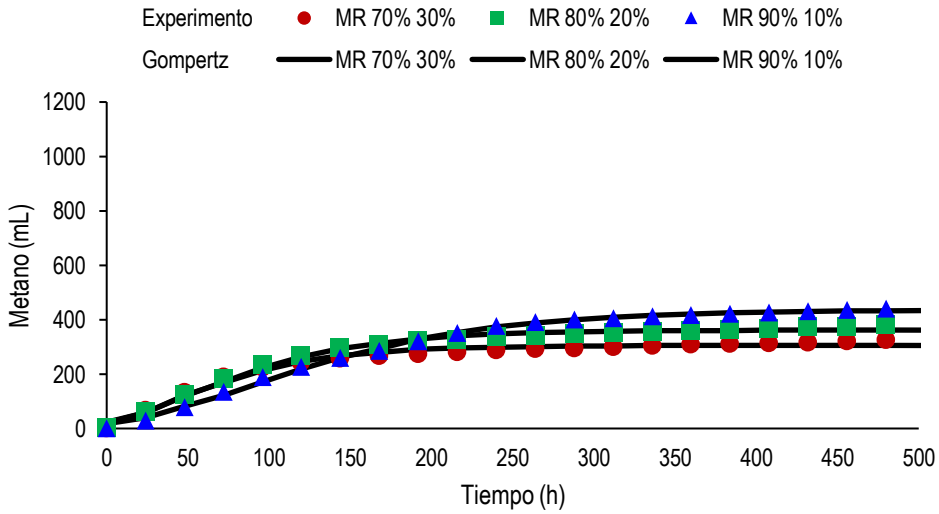


***Figura 55.*** Producción acumulada de metano (mL/h) del tratamiento 75:25, correspondiente a residuos n.º 1 y n.º 2 (mezcla).

## 7.7 Modelo Matemático de Gompertz

En la Figura 56 se presenta el ajuste de las curvas de producción acumulada de metano de los controles y tratamientos al modelo matemático de Gompertz modificado, el cual permitió describir el comportamiento cinético del

proceso de digestión anaerobia y estimar parámetros clave como la producción máxima de metano (Hmax), la velocidad máxima de producción (Rmax) y la fase de latencia (λ).

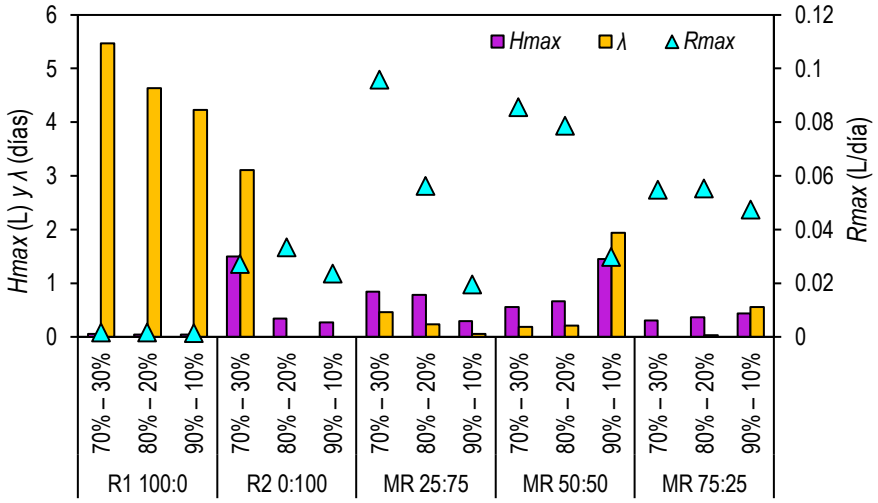


***Figura 56.*** Comportamiento de los parámetros Hmax (L), λ (días) y Rmax (L/día) del modelo matemático de Gompertz en controles (R1 100:0 y R2 0:100) y tratamientos (MR 25:75, MR 50:50 y MR 75:25), bajo diferentes porcentajes de LA inoculado (30 %, 20 % y 10 %).

Por otra parte, el Cuadro 15 muestra las variaciones en los valores de pH registradas en los controles y tratamientos codigeridos, en función de sus respectivas combinaciones de lodo anaerobio y proporción de residuos.

***Cuadro 15.*** Valores de pH previos y posteriores a la codigestión anaerobia de las muestras residuales de estudio (R).

| **Muestra experimental** | **pH Inicial** | **R/MR – LA** | **pH Final** |
|---|---|---|---|
| R1 100:0 | 7.14 | 70% – 30% | 7.24 |
| | | 80% – 20% | 7.18 |
| | | 90% – 10% | 7.09 |
| | | 70% – 30% | 7.58 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| R2 0:100 | 7.12 | 80% – 20% | 6.04 |
| | | 90% – 10% | 5.81 |
| | | 70% – 30% | 7.73 |
| MR 25:75 | 7.15 | 80% – 20% | 7.44 |
| | | 90% – 10% | 5.65 |
| | | 70% – 30% | 7.38 |
| MR 50:50 | 7.02 | 80% – 20% | 7.40 |
| | | 90% – 10% | 7.32 |
| | | 70% – 30% | 7.23 |
| MR 75:25 | 7.13 | 80% – 20% | 7.35 |
| | | 90% – 10% | 7.25 |

### 7.8 Cálculo del Porcentaje de Remoción

En la Figura 57 se presenta el porcentaje de remoción de contaminantes para algunas de las principales variables de estudio evaluadas en los controles y tratamientos de codigestión anaerobia, lo que permitió estimar el grado de estabilización de la materia orgánica y la eficiencia global del proceso.

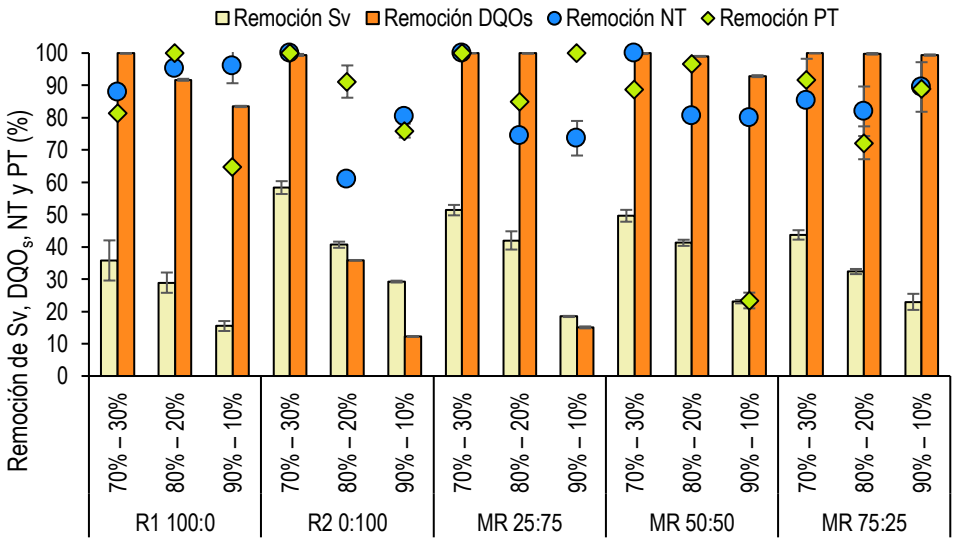


***Figura 57.*** Índice de remoción de Sv, $DQO_s$, NT y PT (%) en controles (R1 100:0 y R2 0:100) y tratamientos (MR 25:75, MR 50:50 y MR 75:25), bajo diferentes porcentajes de LA inoculado (30 %, 20 % y 10 %).

### 7.9 Estimación del Rendimiento de Metano

Posteriormente, las Figuras 58 y 59 representan los gráficos del rendimiento de metano estimado en función de dos variables de estudio: sólidos volátiles removidos y DQO soluble removida, lo que permitió evaluar la eficiencia de conversión del sustrato orgánico hacia metano bajo los distintos controles y tratamientos codigeridos.

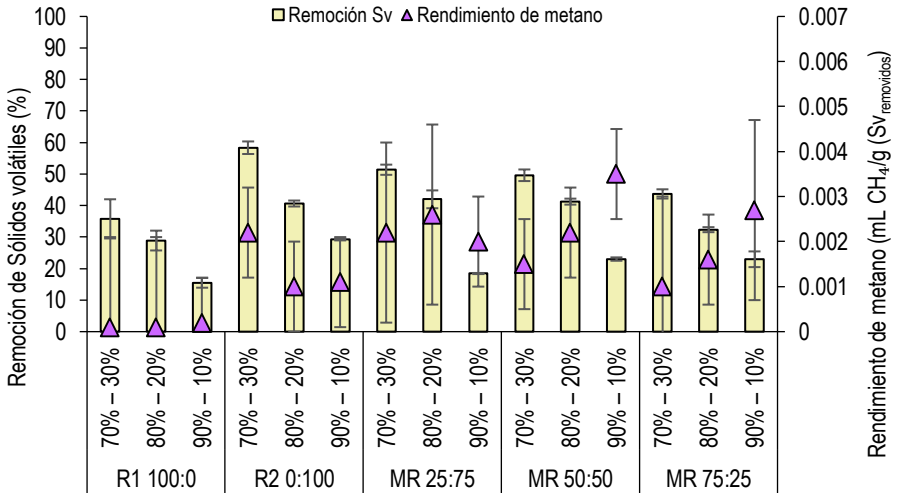


***Figura 58.*** Rendimiento de metano como producción por remoción de sólidos volátiles (mL $CH_4$/g Sv), obtenido en controles (R1 100:0 y R2 0:100) y tratamientos (MR 25:75, MR 50:50 y MR 75:25), bajo diferentes porcentajes de LA inoculado (30 %, 20 % y 10 %).

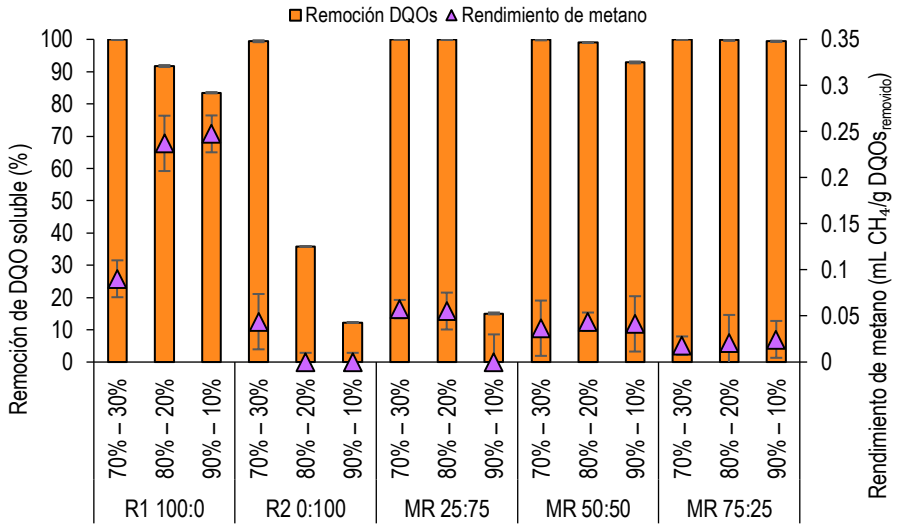


***Figura 59.*** Rendimiento de metano como producción por remoción de DQO soluble (mL $CH_4$/g $DQO_s$), obtenido en controles (R1 100:0 y R2 0:100) y tratamientos (MR 25:75, MR 50:50 y MR 75:25), bajo diferentes porcentajes de LA inoculado (30 %, 20 % y 10 %).

Los resultados globales de la segunda fase se resumen en los Cuadros 16 y 17, donde se integran los parámetros de remoción, producción de metano, rendimiento y tiempos de respuesta del proceso.

***Cuadro 16.*** Análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir del proceso de digestión de controles experimentales con microorganismos anaerobios.

| Muestra (R/MR – LA) | Latencia / adaptación | Producción $CH_4$ (mL) | Remoción (%) | Rendimiento (mL $CH_4$/g) | Desempeño global |
|---|---|---|---|---|---|
| R1 100:0 70% – 30% | Muy lenta (λ mayor) | 28 (baja) | Baja Sv: 35.8 $DQO_s$: 100 NT: 88 PT: 81.4 | Bueno Sv: 0.0001 $DQO_s$: 0.09 | Favorable |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| R1 100:0<br>80% – 20% | Muy lenta | 26 (baja) | Baja<br>Sv: 28.9<br>$DQO_s$: 92<br>NT: 95.35<br>PT: 100 | Muy bueno<br>Sv: 0.0001<br>$DQO_s$: 0.23 | Muy favorable |
| R1 100:0<br>90% – 10% | Muy lenta | 25 (más baja) | Baja<br>Sv: 15.48<br>$DQO_s$: 83<br>NT: 96.01<br>PT: 64.82 | Muy bueno<br>Sv: 0.0002<br>$DQO_s$: 0.24 | Muy favorable |
| R2 0:100<br>70% – 30% | Muy rápida | 1071 (más alta) | Alta<br>Sv: 58.35<br>$DQO_s$: 99<br>NT: 100<br>PT: 100 | Moderado<br>Sv: 0.0022<br>$DQO_s$: 0.04 | Moderado (alta producción, baja eficiencia) |
| R2 0:100<br>80% – 20% | Muy rápida (λ menor) | 362 (alta) | Alta<br>Sv: 40.65<br>$DQO_s$: 36<br>NT: 61.02<br>PT: 91.17 | Muy bajo<br>Sv: 0.001<br>$DQO_s$: 0 | No favorable (hidrólisis) |
| R2 0:100<br>90% – 10% | Muy rápida (λ menor) | 283 (alta) | Alta<br>Sv: 29.23<br>$DQO_s$: 12<br>NT: 80.51<br>PT: 75.98 | Muy bajo<br>Sv: 0.0011<br>$DQO_s$: 0 | No favorable (hidrólisis) |

***Cuadro 17.*** Análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir del proceso de codigestión de tratamientos experimentales con microorganismos anaerobios.

| **Muestra (R/MR – LA)** | **Latencia / adaptación** | **Producción $CH_4$ (mL)** | **Remoción (%)** | **Rendimiento (mL $CH_4$/g)** | **Desempeño global** |
|---|---|---|---|---|---|
| MR 25:75<br>70% – 30% | Rápida | 847 (muy buena) | Muy buena<br>Sv: 51.36<br>$DQO_s$: 100<br>NT: 100<br>PT: 100 | Bueno<br>Sv: 0.0022<br>$DQO_s$: 0.05 | Muy favorable (sinergia) |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MR 25:75<br>80% – 20% | Rápida | 806 (muy buena) | Muy buena<br>Sv: 41.98<br>$DQO_s$: 100<br>NT: 74.54<br>PT: 85 | Bueno<br>Sv: 0.0026<br>$DQO_s$: 0.05 | Muy favorable |
| MR 25:75<br>90% – 10% | Rápida | 284 (muy buena) | Muy buena<br>Sv: 18.44<br>$DQO_s$: 15<br>NT: 73.63<br>PT: 100 | Muy bajo<br>Sv: 0.002<br>$DQO_s$: 0 | No favorable (hidrólisis) |
| MR 50:50<br>70% – 30% | Normal | 573.7 (buena) | Buena<br>Sv: 49.61<br>$DQO_s$: 100<br>NT: 100<br>PT: 88.7 | Moderado<br>Sv: 0.0015<br>$DQO_s$: 0.03 | Moderado y equilibrado |
| MR 50:50<br>80% – 20% | Normal | 667 (buena) | Buena<br>Sv: 41.24<br>$DQO_s$: 99<br>NT: 80.68<br>PT: 96.77 | Moderado<br>Sv: 0.0022<br>$DQO_s$: 0.04 | Moderado y equilibrado |
| MR 50:50<br>90% – 10% | Normal | 593 (buena) | Buena<br>Sv: 23.02<br>$DQO_s$: 93<br>NT: 80<br>PT: 23.38 | Moderado<br>Sv: 0.0035<br>$DQO_s$: 0.04 | Moderado y equilibrado |
| MR 75:25<br>70% – 30% | Lenta (λ menor) | 325.7 (normal) | Normal<br>Sv: 43.69<br>$DQO_s$: 100<br>NT: 85.34<br>PT: 91.66 | Bajo<br>Sv: 0.001<br>$DQO_s$: 0.01 | Limitado pero funcional |
| MR 75:25<br>80% – 20% | Lenta | 379.7 (normal) | Normal<br>Sv: 32.34<br>$DQO_s$: 100<br>NT: 81.98<br>PT: 72.22 | Bajo<br>Sv: 0.0016<br>$DQO_s$: 0.02 | Limitado pero funcional |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MR 75:25<br>90% – 10% | Lenta | 441.7<br>(normal) | Normal<br>Sv: 22.96<br>$DQO_s$: 99<br>NT: 89.5<br>PT: 89.01 | Moderado<br>Sv: 0.0027<br>$DQO_s$: 0.02 | Moderado |

# 8. DISCUSIÓN

## 8.1 Materia Prima de la Fase I

Una vez caracterizadas todas las muestras, el análisis de pH indicó que únicamente el efluente residual Industrial/Coagulación-Floculación (AR-I) se encuentra por encima del rango de tolerancia (6–9) para la descarga de aguas residuales, establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021. Este comportamiento puede asociarse al uso de agentes químicos coagulantes y floculantes durante el tratamiento fisicoquímico industrial, los cuales tienden a modificar la alcalinidad del medio. Valores de pH fuera de norma no solo limitan la descarga directa, sino que también pueden afectar procesos biológicos posteriores, incluyendo sistemas microalgales, al alterar la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad metabólica del cultivo. En cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los resultados indicaron que solo algunos de estos efluentes cumplen con los parámetros normativos, destacando nuevamente el efluente AR-I por presentar los valores más elevados, lo que evidencia una mayor carga orgánica en comparación con el resto de los efluentes analizados. Altas concentraciones de DQO en efluentes industriales han sido ampliamente reportadas en corrientes con presencia de compuestos químicos residuales y materia orgánica no biodegradable, lo que incrementa su potencial contaminante y demanda tratamientos complementarios antes de su disposición final. Respecto a los sólidos, los resultados obtenidos para sólidos totales muestran diferencias significativas entre los distintos tipos de efluentes residuales, observándose las mayores concentraciones en los efluentes AR-C, AR-IC y AR-I, mientras que los efluentes AR-U y AR-O presentaron los valores más bajos. Este comportamiento es consistente con la naturaleza de cada corriente, ya que los procesos de Ultrafiltración y Ósmosis inversa retienen fracciones importantes de sólidos y solutos, generando efluentes de Rechazo con menor carga particulada en comparación con corrientes crudas o parcialmente tratadas.

Si bien la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece límites permisibles para sólidos suspendidos totales y no para sólidos totales, los valores elevados de sólidos totales, particularmente en el efluente AR-I, en conjunto con su alta turbidez y DQO, sugieren la presencia de una fracción importante de sólidos en suspensión. No obstante, debido a que el parámetro evaluado corresponde a sólidos totales, los resultados no permiten determinar de manera directa el cumplimiento normativo, sino únicamente realizar una comparación cualitativa del comportamiento de los efluentes y su carga sólida total (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022). Considerando las diferentes alternativas de manejo y disposición final de los efluentes residuales generados por la empresa INTERNATIONAL, tales como la descarga a cuerpos receptores, su uso para riego, la disposición externa mediante retiro de las instalaciones o su tratamiento previo, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la necesidad de implementar estrategias que permitan reducir su carga contaminante. En este sentido, la aplicación de tratamientos biológicos basados en microalgas y cianobacterias ha demostrado eficiencia en la remoción de materia orgánica, nutrientes y sólidos presentes en efluentes industriales, contribuyendo a mejorar su calidad fisicoquímica y a facilitar el cumplimiento de la normativa ambiental. Particularmente, el uso de *Arthrospira platensis* ha sido reportado como una alternativa viable para la disminución de parámetros críticos como la DQO, la turbidez y la carga sólida, debido a su capacidad de asimilación de nutrientes, fijación de carbono y tolerancia a condiciones variables de salinidad y composición química del medio. Diversos estudios han documentado eficiencias significativas de remoción en sistemas microalgales aplicados a aguas residuales industriales, posicionándolos como tecnologías sostenibles dentro de esquemas de biorremediación y economía circular. Bajo este enfoque, los resultados de caracterización obtenidos en la presente investigación sustentan la pertinencia de evaluar estos efluentes mediante tratamientos microalgales, orientados a la reducción de su carga contaminante y a la valorización de la biomasa generada.

### 8.2 Análisis Fisicoquímicos en el Cultivo de *A. platensis*

### 8.2.1 Crecimiento Celular

Los resultados obtenidos indicaron que, de los nueve controles evaluados, el tratamiento con mayor crecimiento celular fue el número 3 (AP3-6NJ), mientras que el menor crecimiento correspondió al control número 1 (AP1-6NJ). Este comportamiento confirma que el incremento en los niveles de los cuatro parámetros de estudio favorece de manera directa la proliferación celular. La respuesta observada es consistente con lo reportado para cultivos de *Arthrospira platensis*, donde la disponibilidad adecuada de luz, carbono inorgánico, aireación y densidad inocular incide significativamente en la tasa de división celular y en la acumulación de biomasa (Vonshak, 1997; Richmond, 2004).

Con base en el análisis señal/ruido bajo el criterio “mayor es mejor”, se determinó que el nivel óptimo para cada factor corresponde al nivel 3 en concentración del alga, nivel 3 en inoculación, nivel 3 en aireación y nivel 3 en luminosidad, al presentar los valores más altos de S/N (104.68, 105.90, 104.14 y 104.46, respectivamente). Esta combinación (3–3–3–3) representa las condiciones teóricas óptimas para maximizar el crecimiento celular. El análisis de los valores Delta indicó que el factor con mayor influencia sobre la respuesta fue la inoculación ($\Delta = 7.89$), seguido por la concentración del alga ($\Delta = 4.21$), la luminosidad ($\Delta = 4.09$) y finalmente la aireación ($\Delta = 3.58$). Estos resultados evidencian que el tiempo de inoculación fue el parámetro más determinante en el desempeño del sistema bajo las condiciones evaluadas. En conjunto, el análisis estadístico del diseño Taguchi permitió identificar formalmente los niveles óptimos de operación y jerarquizar la influencia de los factores estudiados, completando así la etapa de optimización experimental.

Como se puede apreciar en las Figuras 35 y 36, el comportamiento observado en el tratamiento AR-O-6NJ indicó que la combinación del efluente de Rechazo de Ósmosis con una suplementación completa generó condiciones altamente favorables para el crecimiento de *Arthrospira platensis*.

La presencia de sales disueltas, junto con una adecuada disponibilidad de macro y micronutrientes, favoreció la asimilación de carbono, nitrógeno y fósforo, lo que se tradujo en un aumento significativo tanto del número de células como de la biomasa producida. Este resultado concuerda con lo reportado por Richmond (2004) y Vonshak (1997), quienes señalan que *A. platensis* presenta un mejor desempeño en medios alcalinos con disponibilidad adecuada de nutrientes y cierta carga salina, condiciones que optimizan la actividad fotosintética y la síntesis de biomasa. Por el contrario, el tratamiento AR-O, al no contar con suplementación nutrimental, no presentó crecimiento celular detectable. Este comportamiento sugiere que, aunque el efluente de Rechazo de Ósmosis puede aportar sales y algunos compuestos disueltos, estos no son suficientes para sostener el crecimiento celular sin una fuente adecuada de nutrientes esenciales. En sistemas microalgales, la limitación de nitrógeno, fósforo o micronutrientes inhibe la división celular y restringe la síntesis de biomasa, redirigiendo el metabolismo hacia mecanismos de mantenimiento celular (Markou & Georgakakis, 2011; Markou et al., 2014). Los tratamientos AP-6NJ y AR-O-2NJ mostraron un crecimiento intermedio, lo que evidencia que la suplementación parcial o el uso de un medio libre de sales residuales limita el potencial de crecimiento de *A. platensis* en comparación con el tratamiento AR-O-6NJ. Estos resultados confirman que el crecimiento celular depende de la interacción conjunta entre la disponibilidad de nutrientes, la salinidad, el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto y el equilibrio redox del sistema, parámetros ampliamente descritos como determinantes en la productividad microalgal (Richmond, 2004; Markou & Georgakakis, 2011). Desde el punto de vista normativo, la NOM-001-SEMARNAT-2021 no establece límites para la concentración celular ni para la biomasa microalgal, ya que estos parámetros no representan un contaminante del efluente tratado (SEMARNAT, 2022). Por el contrario, un mayor crecimiento celular es deseable, debido a que implica una mayor eficiencia en la remoción de nutrientes y materia orgánica, así como una mayor generación de biomasa con potencial de aprovechamiento.

En este contexto, el incremento de biomasa observado en AR-O-6NJ representa una ventaja adicional, al permitir la valorización del cultivo bajo esquemas de economía circular (Ferreira et al., 2022). Diversos estudios han reportado resultados exitosos en el cultivo de *Arthrospira platensis* utilizando diferentes tipos de aguas residuales y efluentes industriales, siempre que exista una adecuada suplementación nutrimental y control de las condiciones fisicoquímicas del sistema. Investigaciones previas han demostrado que el uso de efluentes tratados puede sostener altas concentraciones celulares y generar biomasa de interés biotecnológico sin comprometer la estabilidad del cultivo (Park et al., 2011; Markou et al., 2014). En conjunto, los resultados obtenidos indican que el tratamiento AR-O-6NJ fue el más eficiente para promover el crecimiento celular de *Arthrospira platensis*, mientras que el tratamiento AR-O presentó el desempeño más limitado. Esto pone de manifiesto la importancia de la suplementación nutrimental y del control integral de los parámetros operativos para maximizar tanto la producción de biomasa como la eficiencia del tratamiento del efluente residual. Los resultados estadísticos reportados en la Figura 37, refuerzan que la suplementación nutrimental constituye el factor determinante para el crecimiento de *Arthrospira platensis* en efluentes de Rechazo de Ósmosis, evidenciando que la adición parcial o total de nutrientes permite alcanzar productividades comparables al tratamiento control en medio sintético.

### 8.2.2 Oxígeno Disuelto

El comportamiento presentado en la Figura 38, puede atribuirse a que el crecimiento de biomasa microalgal conlleva un consumo de oxígeno disuelto debido a la respiración celular, especialmente durante los periodos sin iluminación. Desde un punto de vista fisiológico, el comportamiento observado es coherente con lo reportado para sistemas microalgales.

Durante el crecimiento activo de *Arthrospira platensis*, la fotosíntesis favorece la producción de oxígeno disuelto en las fases iluminadas, mientras que la respiración celular y la actividad microbiana asociada al efluente pueden

provocar una disminución del OD, particularmente en cultivos con mayor densidad de biomasa (Markou & Georgakakis, 2011). En este sentido, las disminuciones observadas en AR-O-2NJ y AR-O-6NJ sugieren una mayor actividad metabólica y, posiblemente, un mayor crecimiento microalgal respecto a los otros tratamientos. Dicho comportamiento resulta consistente con procesos de asimilación de materia orgánica y nutrientes, en los cuales la microalga, junto con la microbiota asociada, incrementa la demanda de oxígeno para sostener su metabolismo, lo que se refleja en reducciones moderadas del OD sin comprometer la estabilidad del sistema. El incremento del oxígeno disuelto registrado en el tratamiento AR-O podría explicarse por una menor demanda respiratoria o una menor acumulación de biomasa, permitiendo que la producción de oxígeno por fotosíntesis superara su consumo. Este escenario suele asociarse a sistemas con menor carga orgánica disponible o con limitaciones nutricionales que restringen el crecimiento microalgal. En contraste, el tratamiento AP-6NJ, al presentar una variación mínima, indicó un sistema relativamente estable desde el punto de vista metabólico, con un equilibrio entre producción y consumo de oxígeno, lo que sugiere una dinámica biológica menos intensa.

En términos normativos, la NOM-001-SEMARNAT-2021 no establece límites máximos o mínimos obligatorios para el oxígeno disuelto en descargas de aguas residuales; sin embargo, este parámetro es ampliamente utilizado como un indicador indirecto de la calidad del efluente y del estado biológico del sistema. Valores adecuados de OD favorecen procesos aerobios, reducen la generación de compuestos indeseables y reflejan condiciones que no generan impactos adversos inmediatos en cuerpos receptores (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022). Por lo tanto, el hecho de que ninguno de los tratamientos presentara caídas drásticas en el oxígeno disuelto sugiere que los sistemas microalgales se mantuvieron funcionales y estables durante el periodo de estudio, sin evidenciar condiciones de anoxia que pudieran comprometer la eficiencia del tratamiento o la viabilidad de la biomasa.

Con base en estos resultados, puede considerarse que los tratamientos AR-O-2NJ y AR-O-6NJ mostraron un comportamiento favorable desde el punto de vista del tratamiento biológico, al asociarse sus disminuciones de OD con una mayor actividad metabólica y probable generación de biomasa. En contraste, AP-6NJ puede interpretarse como el tratamiento con menor dinamismo biológico, mientras que AR-O reflejó un sistema con menor demanda de oxígeno, posiblemente relacionado con un crecimiento microalgal más limitado.

### 8.2.3 pH, Temperatura, Potencial Óxido Reducción, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Salinidad

En términos generales, el gráfico de la Figura 39, evidenció un incremento del pH desde valores iniciales comprendidos entre 9.0 y 9.5 hasta un rango final aproximado de 10.0 a 10.2, sin sobrepasar el umbral máximo tolerable para *Arthrospira platensis*. Este incremento es característico de sistemas microalgales activos, donde la fotosíntesis y la captación de $CO_2$ desplazan el equilibrio carbonato–bicarbonato del medio, promoviendo condiciones más alcalinas, especialmente bajo disponibilidad nutrimental favorable (Markou & Georgakakis, 2011; Markou et al., 2014). El tratamiento AR-O-2NJ presentó el mayor aumento porcentual de pH (11.66 %), seguido de AR-O-6NJ (11.11 %). El tratamiento control AP-6NJ mostró un incremento más moderado (8 %), comportamiento similar al observado en AR-O. La mayor alcalinización en los tratamientos con adición parcial o total del medio Jourdan sugiere una mayor actividad metabólica de *A. platensis*, favorecida por la disponibilidad de nutrientes esenciales para la fotosíntesis y el crecimiento celular. En contraste, AR-O, formulado únicamente con agua de Rechazo de Ósmosis, presentó el pH más bajo y el menor incremento, atribuible a limitaciones nutrimentales y menor actividad fotosintética. A pesar de las diferencias iniciales, AP-6NJ, AR-O-2NJ y AR-O-6NJ convergieron hacia valores finales similares, indicando que, una vez establecido el cultivo, el metabolismo microalgal tiende a dominar las condiciones fisicoquímicas del sistema y a autorregular el pH hacia su intervalo óptimo.

Desde el punto de vista normativo, la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece al pH como parámetro obligatorio (6–9 para descargas típicas). Si bien los valores obtenidos exceden este rango, su interpretación debe realizarse dentro del contexto de un proceso biológico fotosintético y no como efluente final. En esquemas reales, estos sistemas se integran a etapas posteriores de neutralización o mezcla antes de la descarga. En conjunto, el comportamiento del pH confirma la viabilidad del sistema microalgal, particularmente en tratamientos con suplementación nutrimental, donde se generaron condiciones alcalinas estables compatibles con el crecimiento, la transformación de contaminantes y la generación de biomasa valorizable.

En la Figura 40, Las variaciones de temperatura no fueron abruptas ni excedieron rangos fisiológicamente tolerables. *A. platensis* presenta crecimiento adecuado entre 20–35 °C, con óptimos de 25–30 °C (Vonshak, 1997; Richmond, 2004), por lo que la temperatura no representó un factor limitante ni comprometió la estabilidad metabólica. Normativamente, la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece que las descargas no deben generar alteraciones térmicas en cuerpos receptores. Los valores registrados se mantuvieron compatibles con este criterio, sugiriendo ausencia de impacto térmico adverso. Así, aunque no fue una variable optimizada, su comportamiento homogéneo y dentro de rangos aceptables permite descartar efectos negativos sobre el desempeño del cultivo y respalda la viabilidad del sistema bajo condiciones ambientales reales.

Se puede observar una mayor disminución en el tratamiento AR-O-6NJ, presente en el análisis de ORP de la Figura 41. Esto sugiere una mayor intensidad metabólica y consumo de oxígeno, coherente con mayor disponibilidad nutrimental. AR-O-2NJ mostró un comportamiento intermedio consistente con crecimiento eficiente, mientras que AP-6NJ evidenció menor dinamismo biológico. AR-O, sin nutrientes, reflejó estrés y menor actividad. Dado que la NOM-001-SEMARNAT-2021 no establece límites para ORP, su interpretación es funcional más que normativa.

En conjunto, los resultados confirman que la suplementación nutrimental favoreció sistemas biológicamente más activos. Desde un enfoque mecanístico, la disminución del ORP y el incremento de biomasa en los tratamientos con mayor suplementación nutrimental sugieren una mayor actividad fotosintética y respiratoria, lo que implica una demanda creciente de carbono inorgánico disuelto. En sistemas alcalinos como los utilizados en el cultivo de *Arthrospira platensis*, el carbono se encuentra predominantemente en forma de bicarbonato, cuya disponibilidad puede convertirse en un factor limitante conforme aumenta la densidad celular. Si bien no se realizó medición directa de carbono inorgánico, el comportamiento metabólico observado sugiere que los tratamientos con mayor crecimiento pudieron aproximarse a condiciones de limitación parcial de carbono, particularmente en ausencia de una fuente adicional de $CO_2$. Este aspecto debe considerarse en la interpretación integral del desempeño del sistema.

En las Figuras 42–44, se presentó cierta acumulación de sales durante el cultivo. Esto puede atribuirse a:

- Mineralización de materia orgánica.
- Liberación iónica metabólica.
- Concentración por evaporación.
- Aporte salino del efluente (Rechazo de Ósmosis).

*A. platensis* es halotolerante y requiere sales para su equilibrio osmótico; sin embargo, concentraciones elevadas inducen estrés osmótico y reducen crecimiento (Vonshak, 1997; Richmond, 2004). AP-6NJ mostró condiciones más estables, mientras que AR-O-6NJ registró el mayor incremento, asociado a la carga salina del Rechazo de Ósmosis. AR-O y AR-O-2NJ reflejaron condiciones intermedias mitigadas por la actividad biológica y la suplementación nutrimental (Markou et al., 2014).

Aunque la NOM-001-SEMARNAT-2021 no fija límites para EC, TDS o salinidad, estos parámetros son clave para evaluar reutilización e impacto ambiental. En conjunto, los resultados evidencian que la acumulación de sales fue inherente al uso de efluentes, pero dentro de rangos tolerables para el cultivo, confirmando la capacidad adaptativa de *A. platensis* bajo condiciones de salinidad moderada.

### 8.2.4 Demanda Química de Oxígeno

Posterior a la presentación de la Figura 45, el comportamiento observado debe interpretarse considerando la naturaleza biológica del sistema microalgal. A primera vista, el aumento de la DQO soluble podría asociarse a una ausencia de remoción de materia orgánica; sin embargo, esta interpretación resulta limitada si no se distingue entre la fracción total y la fracción disuelta de la DQO. Diversos estudios han reportado que, en cultivos microalgales y cianobacterianos, el incremento de la DQO soluble puede relacionarse con la liberación de compuestos orgánicos extracelulares al medio, tales como polisacáridos, metabolitos solubles y productos derivados de procesos de lisis celular parcial durante fases de crecimiento activo o estrés metabólico (Markou & Georgakakis, 2011; López et al., 2019). Estos compuestos incrementan la fracción soluble de la materia orgánica sin que ello implique necesariamente un aumento de la carga orgánica total del sistema. Desde un punto de vista termodinámico y de balance de materia, la DQO total en un sistema cerrado no debería incrementarse entre el inicio y el final del proceso, ya que la materia orgánica no se crea, sino que se transforma. No obstante, cuando se evalúa únicamente la fracción soluble, como en este estudio, es posible observar incrementos aparentes derivados de la transferencia de carbono desde formas particuladas o intracelulares hacia el medio líquido, fenómeno ampliamente documentado en sistemas microalgales aplicados al tratamiento de aguas residuales (Park et al., 2011; Metcalf & Eddy, 2014). El tratamiento AR-O-2NJ presentó un comportamiento particularmente relevante, ya que mantuvo prácticamente constante la DQO soluble a lo largo del experimento, a pesar de

mostrar un crecimiento celular favorable. Este resultado sugiere una utilización más eficiente del carbono disponible y una menor liberación de compuestos orgánicos solubles al medio, lo cual puede atribuirse a la limitación parcial de nutrientes impuesta por la adición de únicamente 2/6 de los nutrientes del medio Jourdan. Condiciones de restricción nutrimental moderada han sido asociadas con sistemas metabólicamente más estables y con menor excreción de carbono orgánico disuelto en cultivos microalgales (Markou et al., 2014). En relación con la normativa ambiental, específicamente la NOM-001-SEMARNAT-2021, es importante aclarar que los límites máximos permisibles para la DQO corresponden a la DQO total del efluente, la cual incluye tanto la fracción disuelta como la particulada (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022). Dado que en esta investigación se evaluó exclusivamente la DQO soluble, no es posible realizar una comparación directa ni afirmar el cumplimiento o incumplimiento de los límites normativos en términos de remoción de DQO. No obstante, los resultados obtenidos permiten analizar la dinámica del carbono orgánico soluble y comparar el desempeño relativo de los tratamientos evaluados, lo cual constituye un indicador relevante del comportamiento del sistema microalgal. En conjunto, el análisis de la DQO soluble evidencia que *Arthrospira platensis* modifica activamente la fracción disuelta de la materia orgánica del efluente, mostrando respuestas diferenciadas en función de la suplementación nutrimental. En particular, el tratamiento AR-O-2NJ destacó por su estabilidad en la DQO soluble, lo que sugiere un equilibrio favorable entre crecimiento microalgal y liberación de compuestos orgánicos, posicionándolo como el tratamiento más eficiente desde el punto de vista del control de la carga orgánica soluble, durante la primera fase de estudio.

### 8.2.5 Amonio

El comportamiento presentado en la Figura 46, refleja respuestas metabólicas diferenciadas de *Arthrospira platensis* frente a la disponibilidad de nutrientes y a la matriz del agua utilizada. En los tratamientos AP-6NJ y AR-O-2NJ, la disminución de amonio puede atribuirse principalmente a la asimilación

biológica del nitrógeno amoniacal por parte de la biomasa microalgal. El amonio constituye la fuente preferida de nitrógeno para *A. platensis*, ya que puede ser incorporado directamente al metabolismo celular para la síntesis de aminoácidos, proteínas y otros compuestos nitrogenados esenciales, sin requerir etapas previas de reducción, a diferencia del nitrato (Markou & Georgakakis, 2011). Particularmente, el tratamiento AR-O-2NJ, al contar únicamente con 2 de los 6 nutrientes del medio Jourdan, presentó una condición de limitación nutrimental moderada que favoreció un uso más eficiente del nitrógeno disponible, promoviendo un balance metabólico estable y una remoción neta de amonio del medio. Este comportamiento ha sido previamente reportado en sistemas microalgales bajo condiciones de restricción nutrimental controlada, donde se optimiza la asimilación de nitrógeno y se minimiza su liberación al medio (Markou et al., 2014). Por el contrario, el incremento de amonio observado en el tratamiento AR-O-6NJ indica una dinámica metabólica distinta, caracterizada por la liberación de nitrógeno amoniacal al medio. Aunque este tratamiento recibió la adición completa de los seis nutrientes del medio Jourdan, fue preparado utilizando agua residual de Rechazo de Ósmosis, la cual presenta una carga iónica elevada, particularmente asociada a sales disueltas como cloruro de sodio. Esta condición pudo haber generado una sobrecarga iónica y un aumento de la salinidad total del sistema, induciendo estrés osmótico en la biomasa microalgal, fenómeno ampliamente documentado en cultivos de *Arthrospira* y otras microalgas (Markou & Georgakakis, 2011). Bajo condiciones de exceso nutrimental y estrés salino, *A. platensis* puede experimentar alteraciones en su metabolismo del nitrógeno, tales como una disminución en la eficiencia de asimilación del amonio y un aumento en procesos de desaminación, recambio proteico y lisis celular parcial. Como consecuencia, el nitrógeno previamente incorporado a la biomasa puede ser liberado nuevamente al medio en forma de amonio, lo que explica el incremento observado en este tratamiento. Este comportamiento es consistente con lo reportado en sistemas microalgales sometidos a altas cargas de nutrientes y condiciones de estrés, donde se observa una liberación neta de compuestos nitrogenados al medio (Park et al., 2011).

Desde el punto de vista del tratamiento de efluentes residuales, la disminución de amonio observada en AP-6NJ y, especialmente, en AR-O-2NJ, representa un comportamiento favorable, ya que indica una remoción biológica efectiva del nitrógeno amoniacal. En contraste, el incremento de amonio en AR-O-6NJ no debe interpretarse como un fallo experimental, sino como una respuesta metabólica del sistema ante una combinación de exceso nutrimental y características propias de la matriz del agua residual, tal como ha sido señalado en estudios previos sobre tratamiento de aguas con microalgas (Metcalf & Eddy, 2014; Park et al., 2011). En relación con la normativa ambiental, específicamente la NOM-001-SEMARNAT-2021, es importante señalar que esta regula el Nitrógeno Total en descargas de aguas residuales, el cual incluye todas las formas en que se presenta el nitrógeno, entre ellas el amonio (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022). Dado que en este estudio se evaluó únicamente el amonio, no es posible establecer una comparación directa para afirmar el cumplimiento o incumplimiento de los límites normativos. No obstante, su medición permitió analizar tendencias relevantes del comportamiento del nitrógeno en el sistema. En conjunto, los resultados del análisis de amonio evidencian que *Arthrospira platensis* responde de manera diferenciada a la disponibilidad nutrimental y a la composición iónica del agua residual. Condiciones de limitación moderada, como las empleadas en el tratamiento AR-O-2NJ, favorecen la asimilación de amonio y la estabilidad metabólica del sistema, mientras que la adición completa de nutrientes en matrices con alta carga salina puede inducir la liberación de nitrógeno amoniacal al medio.

Estos resultados confirman la importancia de considerar tanto la composición del efluente como la estrategia de suplementación nutrimental para optimizar la remoción de nitrógeno en sistemas microalgales aplicados al tratamiento de aguas residuales.

### 8.2.6 Ortofosfatos

Las diferencias observadas en la Figura 47, reflejan respuestas metabólicas diferenciadas de *Arthrospira platensis*, asociadas tanto a la disponibilidad nutrimental como a la matriz del agua utilizada en cada tratamiento. La disminución observada en el tratamiento control AP-6NJ puede atribuirse a la asimilación directa del fósforo inorgánico por parte de la biomasa microalgal. Al haberse preparado este tratamiento con agua purificada y medio Jourdan completo, se generaron condiciones más controladas y favorables para el crecimiento de *A. platensis*, promoviendo la incorporación del fósforo disuelto al metabolismo celular. Este comportamiento es consistente con lo reportado en cultivos microalgales desarrollados en matrices con baja interferencia iónica, donde el fósforo disponible es consumido eficientemente durante el crecimiento activo (Markou & Georgakakis, 2011; Park et al., 2011). En contraste, los incrementos de ortofosfatos observados en los tratamientos AR-O-2NJ y AR-O-6NJ indicaron una dinámica distinta del fósforo en el sistema. Ambos tratamientos fueron preparados con agua residual de Rechazo de Ósmosis, la cual presenta una composición química más compleja y puede contener fósforo residual en diferentes formas. En el caso del tratamiento AR-O-2NJ, la adición parcial de nutrientes del medio Jourdan pudo haber generado condiciones de limitación nutrimental, favoreciendo procesos de liberación de fósforo al medio, ya sea por recambio metabólico, excreción de compuestos fosforilados o mineralización de fósforo intracelular previamente almacenado (Markou et al., 2014). El tratamiento AR-O-6NJ presentó el mayor incremento de ortofosfatos, lo cual sugiere que la combinación de agua residual de Rechazo y la adición completa de nutrientes pudo haber inducido un desbalance metabólico en *Arthrospira platensis*. Bajo condiciones de exceso nutrimental y mayor carga iónica pueden presentarse procesos de estrés fisiológico, tales como disminución en la eficiencia de asimilación del fósforo, liberación de compuestos intracelulares e incluso lisis celular parcial, lo que conlleva a la liberación del fósforo contenido en la biomasa al medio en forma de ortofosfatos (Park et al., 2011; Markou & Georgakakis, 2011). Adicionalmente, el comportamiento de los ortofosfatos puede relacionarse con las condiciones de pH registradas durante el experimento.

Durante la fase 1, los tratamientos presentaron un incremento del pH desde valores iniciales cercanos a 9–9.5 hasta un rango aproximado de 10–10.2. Si bien estas condiciones favorecen el crecimiento de *A. platensis*, también pueden influir en la solubilidad y disponibilidad del fósforo inorgánico. En medios alcalinos, ciertos compuestos fosforilados pueden permanecer en solución o liberarse al medio, particularmente en matrices complejas como el agua residual de Rechazo, contribuyendo al incremento de ortofosfatos medidos (Mahmoud et al., 2016; Markou & Georgakakis, 2011). Desde la perspectiva del tratamiento de efluentes residuales, la disminución de ortofosfatos observada en el tratamiento control AP-6NJ representó un comportamiento favorable, al indicar una remoción neta de fósforo inorgánico del medio. Por el contrario, los incrementos registrados en AR-O-2NJ y AR-O-6NJ no resultaron deseables en términos de remoción de contaminantes, ya que sugieren una liberación neta de fósforo al agua tratada. No obstante, estos resultados no deben interpretarse como fallos experimentales, sino como una manifestación de la influencia que ejerce la matriz del agua residual, la estrategia de suplementación nutrimental y las condiciones fisicoquímicas del sistema sobre la dinámica del fósforo (Metcalf & Eddy, 2014). En relación con la normativa ambiental, la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece límites para el fósforo total en descargas de aguas residuales, el cual engloba todas las formas en que este elemento puede encontrarse presente. Dado que en este estudio se evaluaron únicamente los ortofosfatos solubles, no es posible realizar una comparación directa con los valores normativos. Sin embargo, los resultados permiten identificar tendencias relevantes sobre el comportamiento del fósforo en el sistema, donde la disminución de ortofosfatos sugiere potencial de remoción, mientras que los incrementos observados indican posibles limitaciones del proceso para el cumplimiento de criterios regulatorios (SEMARNAT, 2022).

En conjunto, el análisis de ortofosfatos evidenció que *Arthrospira platensis* responde de manera sensible a la composición del efluente, a la disponibilidad

nutrimental y a las condiciones de pH, mostrando comportamientos de asimilación o liberación de fósforo dependiendo del equilibrio del sistema. Estos resultados resaltan la importancia de optimizar tanto la matriz del agua residual como la estrategia de suplementación y los parámetros fisicoquímicos para favorecer la remoción de fósforo en sistemas microalgales aplicados al tratamiento de aguas residuales.

## 8.3 Análisis Bioquímicos *de Biomasa de A. platensis*

### 8.3.1 Lípidos

El comportamiento de este análisis presentado en la Figura 48, sugiere que la acumulación de lípidos en *A. platensis* estuvo fuertemente influenciada por la disponibilidad de nutrientes y por la naturaleza de la matriz del agua utilizada. El mayor contenido lipídico observado en AR-O-2NJ puede atribuirse a condiciones de limitación nutrimental generadas por la adición parcial del medio Jourdan, en combinación con el uso de agua residual de Rechazo Osmótica. Bajo estas condiciones, las microalgas y cianobacterias suelen reducir su tasa de crecimiento y la síntesis proteica, redirigiendo el carbono disponible hacia la acumulación de compuestos de reserva, principalmente lípidos neutros, como mecanismo de almacenamiento energético (Markou et al., 2014; Converti et al., 2009). En el tratamiento control AP-6NJ, preparado con agua purificada y medio Jourdan completo, se observaron concentraciones intermedias de lípidos. Estas condiciones balanceadas favorecen un crecimiento celular estable, donde la biomasa producida se caracteriza principalmente por la síntesis de componentes estructurales y funcionales, como proteínas y lípidos de membrana, más que por la acumulación de lípidos de reserva (Markou & Georgakakis, 2011; Park et al., 2011). Por el contrario, el tratamiento AR-O-6NJ presentó el menor contenido lipídico, lo cual puede asociarse a un desbalance metabólico inducido por la combinación de agua residual de Rechazo y la adición completa de nutrientes. La elevada carga iónica y el exceso nutrimental pueden generar condiciones de estrés fisiológico, obligando a *Arthrospira platensis* a destinar energía a procesos de regulación osmótica y mantenimiento celular, en detrimento de la acumulación

de compuestos de reserva como los lípidos (Hu et al., 2008; Markou & Georgakakis, 2011). Desde el punto de vista biotecnológico, estos resultados resultan particularmente relevantes, ya que el contenido lipídico determina posibles usos futuros de la biomasa. La biomasa producida en AR-O-2NJ, con mayor acumulación de lípidos, presenta un mayor potencial para aplicaciones orientadas a la producción de biocombustibles, bioaceites u otros productos de interés energético. En contraste, la biomasa obtenida en AP-6NJ, con un contenido intermedio, podría destinarse a aplicaciones donde se priorice la obtención de biomasa con características metabólicas balanceadas. Cabe destacar que el contenido de lípidos en biomasa no es un parámetro regulado por la NOM-001-SEMARNAT-2021, ya que dicha normativa se enfoca en la calidad del efluente y no en la composición bioquímica de la biomasa generada. No obstante, su análisis complementa la evaluación integral del proceso, aportando información valiosa sobre el potencial de valorización de la biomasa producida (SEMARNAT, 2022; Metcalf & Eddy, 2014). En conjunto, el análisis de lípidos evidencia que *Arthrospira platensis* responde de manera diferenciada a la disponibilidad nutrimental y a la matriz del agua residual, ajustando su metabolismo para favorecer ya sea el crecimiento celular o la acumulación de compuestos de reserva. Estos resultados resaltan la importancia de optimizar las condiciones de cultivo en función del objetivo final del proceso, ya sea la remoción de contaminantes, la producción de biomasa o la obtención de bioproductos de valor agregado.

### 8.3.2 Ficocianina

Este comportamiento presentado por la Figura 49, indica que la síntesis y acumulación de ficocianina estuvo fuertemente influenciada por la disponibilidad de nutrientes y por la naturaleza de la matriz del agua empleada en cada tratamiento, de manera similar a lo reportado en otros sistemas microalgales sometidos a distintas condiciones de cultivo (Markou & Georgakakis, 2011; Markou et al., 2014). El mayor contenido y rendimiento de ficocianina observado en AR-O-2NJ puede atribuirse a condiciones de limitación nutrimental moderada

generadas por la adición parcial de nutrientes del medio Jourdan, combinadas con el uso de agua residual de Rechazo Ósmótica. Bajo estas condiciones, *Arthrospira platensis* puede redirigir su metabolismo hacia la síntesis de pigmentos accesorios como la ficocianina, los cuales cumplen funciones fotosintéticas y de almacenamiento de nitrógeno, favoreciendo su acumulación intracelular. Este comportamiento ha sido reportado en estudios donde la restricción nutrimental induce una mayor producción de ficobiliproteínas de interés biotecnológico (Eriksen, 2008; Markou et al., 2014). En contraste, el tratamiento control AP-6NJ, preparado con agua purificada y medio completo, presentó valores intermedios de concentración, pureza y rendimiento. Estas condiciones balanceadas promueven un crecimiento celular estable, en el que la síntesis de pigmentos se mantiene en niveles moderados, sin una acumulación marcada de ficobiliproteínas, comportamiento consistente con cultivos desarrollados bajo condiciones óptimas de crecimiento (Markou & Georgakakis, 2011; Park et al., 2011). Por su parte, el tratamiento AR-O-6NJ mostró los valores más bajos de concentración, pureza y rendimiento de ficocianina. Este comportamiento puede asociarse a un desbalance metabólico inducido por la combinación de una matriz residual más compleja y la adición completa de nutrientes, condiciones que pueden generar estrés fisiológico y un mayor gasto energético en procesos de mantenimiento celular y regulación osmótica. Bajo este escenario, la síntesis de metabolitos secundarios como la ficocianina puede verse limitada, reduciendo su acumulación intracelular (Markou & Georgakakis, 2011; Chaiklahan et al., 2012). De manera complementaria, durante el desarrollo experimental se observaron diferencias visuales en la coloración de la biomasa y de los extractos obtenidos tras el proceso de extracción. La biomasa del tratamiento AR-O-2NJ presentó una coloración verde más intensa, mientras que el sobrenadante mostró un tono azul profundo característico de extractos con alta concentración y pureza de ficocianina. En contraste, AP-6NJ presentó un color azul turquesa y AR-O-6NJ un tono azul verdoso, lo cual sugiere mayor interferencia de otros pigmentos como la clorofila. Estas observaciones cualitativas son coherentes con los resultados analíticos y han sido reportadas

previamente como indicativas de la pureza relativa de extractos de ficocianina (Eriksen, 2008; Chaiklahan et al., 2012). Desde el punto de vista biotecnológico, los resultados indican que la biomasa generada bajo condiciones de limitación nutrimental moderada presenta un mayor potencial para la obtención de ficocianina como bioproducto de alto valor agregado. Al igual que en el análisis de lípidos, el tratamiento AR-O-2NJ se perfila como el escenario más favorable para la valorización de la biomasa, mientras que el tratamiento control ofrece un balance entre crecimiento y producción de pigmentos, y AR-O-6NJ refleja un metabolismo orientado principalmente al mantenimiento celular (Metcalf & Eddy, 2014). Cabe destacar que la producción de ficocianina no es un parámetro regulado por la NOM-001-SEMARNAT-2021, dado que esta normativa se enfoca en la calidad del efluente tratado y no en la composición bioquímica de la biomasa generada. No obstante, su determinación resulta relevante para evaluar el desempeño integral del sistema microalgal, considerando no solo la remoción de contaminantes, sino también la obtención de compuestos de interés comercial y biotecnológico (SEMARNAT, 2022). En conjunto, el análisis de ficocianina evidenció que *Arthrospira platensis* responde de manera diferenciada a la disponibilidad de nutrientes y a la matriz del agua residual, modulando su metabolismo para favorecer la síntesis de pigmentos bajo condiciones específicas. Estos resultados resaltan la importancia de ajustar las condiciones de cultivo en función de los objetivos del proceso, ya sea el tratamiento de efluentes, la producción de biomasa o la obtención de bioproductos de alto valor agregado.

En términos generales, el Cuadro 11 indicó que el tratamiento control de *A. platensis* en agua purificada adicionada con 6/6 nutrientes del medio Jourdan (AP-6NJ) presentó un comportamiento adecuado, evidenciado por una alta concentración celular y un buen color del cultivo. El oxígeno disuelto mostró una ligera disminución, comportamiento esperado en sistemas con producción activa de biomasa microalgal dentro del biorreactor. Los análisis multiparamétricos, como pH, ORP y salinidad, mostraron estabilidad, indicando que la composición

del tratamiento fue apropiada. En cuanto a los análisis fisicoquímicos, se observó un incremento considerable en la DQO desde el inicio hasta el final del experimento; en contraste, el amonio presentó una disminución importante, mientras que los ortofosfatos también disminuyeron, aunque en menor proporción. Considerando este balance general, el tratamiento control fue clasificado como uno de los más equilibrados. Por otro lado, el tratamiento de *A. platensis* en el efluente residual de Rechazo de Ósmosis sin adición de nutrientes (AR-O) no presentó un desempeño favorable, al registrar la concentración celular más baja y una pérdida evidente de color en el cultivo. Asimismo, el oxígeno disuelto mostró un incremento en lugar de una disminución, comportamiento atípico si se considera que el crecimiento microalgal suele asociarse con consumo de oxígeno. De igual manera, los análisis multiparamétricos de pH, ORP y salinidad se vieron afectados por la composición del tratamiento, evidenciando condiciones poco adecuadas para el desarrollo microalgal. Por este motivo, el tratamiento no fue considerado para un análisis fisicoquímico detallado, clasificándose globalmente como no favorable o disfuncional. En contraste, el tratamiento de *A. platensis* en el efluente residual de Rechazo de Ósmosis adicionado con 2/6 nutrientes del medio Jourdan (AR-O-2NJ) mostró un desempeño altamente favorable, al presentar una concentración celular elevada y un buen color del cultivo. El oxígeno disuelto disminuyó de manera significativa, confirmando una adecuada producción de biomasa. Los análisis multiparamétricos de pH, ORP y salinidad exhibieron un comportamiento estable, sugiriendo que la composición del tratamiento fue eficiente para el desarrollo microalgal. En los análisis fisicoquímicos se observó un aumento mínimo en la DQO, una disminución considerable del amonio y un ligero incremento en los ortofosfatos. En conjunto, este tratamiento fue clasificado como el más favorable entre los evaluados. Finalmente, el tratamiento de *A. platensis* en el efluente residual de Rechazo de Ósmosis adicionado con 6/6 nutrientes del medio Jourdan (AR-O-6NJ) también presentó un funcionamiento adecuado, alcanzando la concentración celular más alta y manteniendo un buen color del cultivo. El oxígeno disuelto disminuyó de forma notable, indicando una elevada producción

de biomasa. En cuanto a los análisis multiparamétricos de pH, ORP y salinidad, estos mostraron un comportamiento aceptable; no obstante, se identificaron ciertos riesgos asociados a la composición del tratamiento. En los análisis fisicoquímicos se registraron incrementos importantes en DQO, amonio y ortofosfatos, lo que sugiere que, aunque el tratamiento es funcional desde el punto de vista del crecimiento microalgal, presenta limitaciones en términos de remoción de contaminantes. En este contexto, se identifican dos aspectos estratégicos relevantes para la empresa INTERNATIONAL. Por un lado, algunos tratamientos favorecen una elevada producción de biomasa microalgal susceptible de aprovechamiento económico y sustentable; por otro, la eficiencia en la remoción de contaminantes no necesariamente se optimiza bajo las mismas condiciones. Por lo tanto, la selección del tratamiento más conveniente dependerá del objetivo principal del proceso, ya sea la generación de biomasa o la reducción de la carga contaminante del efluente.

En el Cuadro 12 se puede observar que, de manera global, la biomasa resultante de los tres tratamientos funcionales fue evaluada mediante la determinación de lípidos y ficocianina: concentración (Conc.), pureza (Pur.) y rendimiento (Rend.). En el caso de la biomasa del tratamiento control AP-6NJ, esta presentó un color verde con baja intensidad de brillo. Los resultados del análisis de lípidos fueron favorables. En cuanto a la ficocianina, se obtuvieron valores adecuados de concentración, pureza y rendimiento, reflejados en un sobrenadante de color azul turquesa intenso. En conjunto, su desempeño global fue clasificado como favorable. La biomasa del tratamiento AR-O-2NJ presentó un color verde oscuro característico de un cultivo funcional de *Arthrospira*. Este tratamiento mostró los mejores resultados en el análisis de lípidos, registrando el mayor porcentaje. Asimismo, obtuvo los valores más altos de ficocianina en concentración, pureza y rendimiento, generando un sobrenadante de color azul marino intenso. Estos resultados posicionaron a este tratamiento como el de desempeño global más favorable. Por su parte, la biomasa del tratamiento AR-O-6NJ presentó un color verde brillante. Los resultados del análisis de lípidos

fueron adecuados, mientras que la concentración, pureza y rendimiento de ficocianina se ubicaron en rangos normales, produciendo un sobrenadante de color azul verdoso intenso. En consecuencia, su desempeño global fue clasificado como aceptable. Finalmente, considerando el conjunto de resultados obtenidos, las biomasas generadas a partir de los tratamientos evaluados demostraron un potencial de aprovechamiento en distintas aplicaciones, ya sea para la obtención de lípidos de interés biotecnológico o para la recuperación de ficocianina como pigmento natural de valor agregado en la industria alimentaria. Estos hallazgos evidencian la versatilidad de la biomasa microalgal como materia prima dentro de un esquema de valorización integral.

### 8.4 Biocarbón

Como fue mencionado previamente, las biomasas correspondientes al tratamiento control AP-6NJ y al tratamiento AR-O-6NJ no fueron consideradas como sustrato para la generación de biocarbón, debido a que no fueron las más destacadas en sus respectivos análisis previos. En contraste, el tratamiento AR-O-2NJ sí presentó los mejores resultados. Por esta razón, su biomasa fue seleccionada como sustrato, lo que permitió la obtención de un biocarbón como producto final con características de partícula fina y elevada área superficial aparente, lo cual lo posiciona como un material con potencial para su uso futuro como adsorbente.

El proceso de carbonización programado en el equipo se dividió en cinco etapas principales, cada una con sus respectivos tiempos de residencia y temperaturas de pirólisis. La primera etapa consistió en un calentamiento a 200 °C durante 35 minutos, seguida de una segunda etapa de mantenimiento a la misma temperatura durante 30 minutos. Posteriormente, se llevó a cabo una tercera etapa correspondiente al incremento de temperatura hasta 450 °C durante 83 minutos. Una vez alcanzada esta temperatura, se mantuvo durante 60 minutos como cuarta etapa del proceso.

Finalmente, se ejecutó una quinta etapa correspondiente al enfriamiento controlado del sistema (programa automático del equipo) durante 121 minutos. En conjunto, el programa térmico completo presentó una duración total aproximada de 329 minutos (5 horas con 29 minutos). El rendimiento gravimétrico del biocarbón fue determinado a partir de una masa seca inicial de 5.0000 g de biomasa impregnada y una masa final recuperada posterior a la pirólisis de 3.3461 g, obteniéndose un rendimiento másico de 66.92 %. Este valor se encuentra asociado a la activación química con ácido fosfórico y a la temperatura de carbonización empleada (450 °C), condiciones que favorecen la conservación estructural del material carbonoso y limitan la pérdida excesiva de masa durante el proceso térmico. De acuerdo con Ioannidou y Zabaniotou (2007), la activación con $H_3PO_4$ promueve reacciones de deshidratación y reticulación estructural que incrementan el rendimiento del material carbonizado en comparación con procesos sin agente activante. Asimismo, Liou (2010) reporta que en procesos de carbonización entre 400 y 500 °C los rendimientos pueden variar considerablemente dependiendo del tipo de biomasa y del tratamiento químico previo, situándose comúnmente entre 30 y 60 %. En este contexto, el rendimiento obtenido en el presente estudio se ubica dentro del rango superior reportado, lo cual sugiere una adecuada retención de material carbonoso bajo las condiciones experimentales empleadas. En cuanto a las propiedades fisicoquímicas del material obtenido, la impregnación con ácido fosfórico al 85 % de la muestra sustrato microalgal previa al proceso de pirólisis resultó en una acidificación del biocarbón como producto final, presentando una disminución en el valor de su pH (1–2). Posteriormente, se realizó un lavado basificante con NaOH 5 M, lo cual generó un incremento directo en su valor (11–13). Finalmente, para obtener el rango óptimo de pH (6–8), se efectuaron los lavados necesarios con agua destilada, acompañados de agitación y centrifugación, hasta alcanzar la neutralidad deseada. En términos operativos, la temperatura máxima de pirólisis aplicada fue de 450 °C, con un tiempo de residencia de 60 minutos a dicha temperatura bajo atmósfera inerte de nitrógeno ($N_2$).

Estas condiciones térmicas, junto con el tiempo total del programa de 329 minutos, influyeron directamente en la estructura y rendimiento final del biocarbón obtenido. Es importante señalar que en el presente estudio no se determinaron parámetros adicionales de caracterización tales como área superficial específica ni contenido de cenizas. Por lo tanto, aunque la morfología fina observada sugiere un comportamiento potencialmente favorable como material adsorbente, la confirmación de estas propiedades requeriría análisis fisicoquímicos complementarios en estudios posteriores.

### 8.5 Medición de la Producción de Biogás (Metano)

Los gráficos presentes en las Figuras 51 y 52 correspondientes a los controles, mostraron comportamientos contrastantes tras la digestión anaerobia. El control de lodos presentó producciones prácticamente nulas de metano, lo cual puede atribuirse a que el lodo de filtro prensa ya no conserva características biodegradables suficientes para sostener la actividad metanogénica. Esto sugiere una baja biodegradabilidad del sustrato o la posible presencia de compuestos inhibitorios asociados a la carga orgánica residual. Este comportamiento coincide con lo reportado por Julio et al. (2016), quienes observaron escasa producción de metano al digerir lodos sin cosustratos, debido a la limitada disponibilidad de carbono fácilmente degradable. En contraste, el control de residuos alimentarios presentó de las producciones más altas de metano. Este resultado se asocia a la presencia de carbohidratos, azúcares y lípidos fácilmente biodegradables, los cuales favorecen la actividad de bacterias metanogénicas. De esta manera, los controles permitieron establecer escenarios disfuncionales y funcionales en sus distintas combinaciones porcentuales. Por otro lado, los gráficos presentes en las Figuras 53–55 correspondientes a los tratamientos, evidenciaron el comportamiento del metano durante la codigestión anaerobia de la mezcla de residuos (MR). El tratamiento con mayor proporción de residuos alimentarios y menor cantidad de lodo presentó una producción muy elevada de metano, evidenciando un efecto sinérgico positivo de la codigestión.

Este resultado demuestra que la adición de residuos ricos en carbono mejora la disponibilidad de nutrientes y equilibra la relación carbono/nitrógeno (C/N), favoreciendo la actividad microbiana. Esta mejora no solo se reflejó en mayores volúmenes acumulados, sino también en un incremento del rendimiento específico de metano por g Sv, evidenciando una conversión más eficiente de la materia orgánica. Desde una perspectiva cinética, el mejor desempeño de las mezclas puede explicarse por un efecto de complementariedad de sustratos. El lodo residual de filtro prensa aporta fracción orgánica parcialmente estabilizada y microorganismos adaptados, mientras que los residuos alimentarios contienen compuestos fácilmente biodegradables (carbohidratos y azúcares solubles). La combinación 50:50 favorece un balance adecuado entre disponibilidad inmediata de sustrato y estabilidad del sistema, evitando tanto limitaciones por baja carga orgánica como inhibiciones por sobreacumulación de ácidos grasos volátiles. Este equilibrio promueve una transición más eficiente entre las etapas hidrolítica, acidogénica y metanogénica del proceso anaerobio, lo que se refleja en una producción acumulada de metano superior a la digestión individual. Posteriormente, el tratamiento con proporciones equivalentes de lodo y residuos alimentarios mostró una producción también elevada, con un comportamiento cinético equilibrado. Esta condición sugiere la existencia de una proporción óptima entre ambos sustratos, permitiendo mantener la estabilidad del pH y evitando la acumulación de ácidos grasos volátiles, factores clave para la eficiencia del proceso. Resultados similares fueron reportados por Del Ángel et al. (2021), quienes observaron incrementos significativos en la producción de biohidrógeno al combinar efluentes cerveceros con residuos agrícolas en proporciones balanceadas. Finalmente, el tratamiento con mayor proporción de lodo y menor cantidad de residuos alimentarios presentó una producción moderada de metano, lo cual podría indicar que el exceso de lodo reduce la degradabilidad global del sustrato y, en consecuencia, la generación de biogás. No obstante, los tres tratamientos evaluados fueron clasificados como funcionales dentro de sus respectivas combinaciones porcentuales. Si bien los valores absolutos permiten observar la tendencia general del proceso, el análisis

comparativo se realizó principalmente con base en el rendimiento específico de metano por g Sv, parámetro considerado estándar en estudios de digestión anaerobia. De manera complementaria, se estimó el rendimiento de metano con base en la $DQO_s$ removida; sin embargo, el parámetro de referencia para comparación técnica se mantuvo como mL $CH_4$/g Sv, al representar directamente la fracción orgánica susceptible de biodegradación y permitir evaluar la eficiencia de conversión del sustrato. En conjunto, los resultados confirmaron que la codigestión anaerobia entre lodo cervecero y residuos alimentarios no solo incrementa la producción acumulada de metano, sino que mejora la eficiencia específica de conversión de sólidos volátiles, evidenciando un efecto sinérgico asociado al balance nutrimental y a la optimización del aprovechamiento de la materia orgánica.

### 8.6 Modelo Matemático de Gompertz

El análisis cinético evidenció diferencias claras entre los sistemas evaluados. El control de lodos presentó una producción prácticamente nula de metano, acompañada de una fase lag prolongada y una velocidad de producción mínima. Este comportamiento confirma la baja biodegradabilidad del sustrato cuando es digerido de manera individual, así como posibles limitaciones nutrimentales o la presencia de compuestos inhibitorios que restringen la actividad metanogénica. Por el contrario, el control de residuos alimentarios mostró una producción adecuada de metano, con una fase de latencia dentro de rangos normales y una velocidad de producción moderada. Este desempeño se asocia a la alta disponibilidad de materia orgánica fácilmente degradable, particularmente carbohidratos y lípidos, los cuales favorecen una rápida activación del consorcio microbiano anaerobio. Las tres mezclas de residuos evaluadas mediante codigestión presentaron los mejores desempeños cinéticos, evidenciados por producciones elevadas de metano, fases lag reducidas y velocidades máximas de producción superiores a las observadas en los controles. Estos resultados confirman el efecto sinérgico de la codigestión anaerobia, donde la combinación de sustratos mejora el balance nutrimental, la

relación carbono/nitrógeno y la estabilidad del proceso, favoreciendo la actividad de los microorganismos metanogénicos. Desde una perspectiva biológica, el parámetro λ (fase de latencia) representa el periodo de adaptación del consorcio microbiano a las condiciones del sustrato y del medio. Durante esta etapa ocurren procesos de aclimatación metabólica, activación enzimática y ajuste en la estructura poblacional de las comunidades hidrolíticas, acidogénicas y metanogénicas. Un valor elevado de λ puede asociarse a limitaciones nutrimentales, desbalances en la relación carbono/nitrógeno (C/N) o a la presencia de compuestos potencialmente inhibitorios derivados del lodo, tales como acumulación de amonio, ácidos grasos volátiles o metales traza en concentraciones elevadas. En el caso del control de lodos, la fase lag prolongada sugiere que el consorcio microbiano requirió un mayor tiempo de adaptación debido a la baja disponibilidad de carbono fácilmente biodegradable y a posibles efectos inhibitorios asociados a la matriz residual. Por el contrario, los sistemas codigeridos presentaron valores reducidos de λ, lo cual indica una adaptación más rápida del consorcio microbiano, favorecida por el equilibrio nutrimental y la mayor biodisponibilidad de sustratos orgánicos. Esto confirma que la codigestión no solo incrementa la producción total de metano, sino que también optimiza la dinámica inicial del proceso, reduciendo tiempos de arranque y mejorando la estabilidad metabólica del sistema. Adicionalmente, la calidad del ajuste del modelo fue evaluada mediante el coeficiente de determinación ($R^2$) y el error cuadrático medio (RMSE). Los valores de $R^2$ oscilaron entre 0.986 y 0.999 en los controles y tratamientos evaluados, lo que indica que el modelo explicó entre el 98.6 % y el 99.9 % de la variabilidad observada en la producción acumulada de metano. Estos resultados evidencian una alta concordancia entre los datos experimentales y los valores predichos por el modelo de Gompertz modificado. Por su parte, los valores de RMSE variaron entre 0.68 mL y 69.73 mL, dependiendo de la magnitud de producción de cada sistema. En términos relativos, los errores representaron menos del 10 % de la producción máxima acumulada registrada en cada tratamiento, confirmando la consistencia del ajuste y la validez de los parámetros cinéticos estimados (Hmax, Rmax y λ). Los altos

valores de coeficiente de determinación ($R^2 > 0.98$ en la mayoría de los tratamientos) indican que el modelo cinético describe adecuadamente la dinámica de producción de metano, lo cual sugiere que el proceso estuvo gobernado por limitaciones biológicas y no por fluctuaciones aleatorias del sistema. En el caso de la mezcla 50:50, el buen ajuste cinético confirma que la codigestión no solo incrementó el volumen acumulado de metano, sino que también estabilizó la velocidad específica de producción, evidenciando un sistema más robusto desde el punto de vista microbiológico. En conjunto, los indicadores estadísticos obtenidos demuestran que el modelo de Gompertz describe adecuadamente el comportamiento cinético de la digestión anaerobia bajo las condiciones experimentales evaluadas, por lo que su aplicación en el presente estudio no es meramente descriptiva, sino cuantitativamente sustentada.

El Cuadro 15 indicó que, en algunos controles y tratamientos se presentó una disminución del pH durante los primeros días del proceso, lo cual sugiere el predominio de la etapa de acidogénesis. En esta segunda fase, los compuestos orgánicos complejos, particularmente los carbohidratos, son transformados rápidamente en ácidos orgánicos de cadena corta, provocando una acidificación temporal del medio. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se establece que los carbohidratos constituyen los sustratos más fácilmente convertidos en ácidos durante las etapas iniciales de la digestión anaerobia (Appels et al., 2008). Es importante considerar que la digestión anaerobia comprende cuatro etapas fundamentales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. No obstante, estas fases no siempre ocurren de manera estrictamente secuencial, sino que pueden superponerse dependiendo de las condiciones operativas del sistema. El avance o retraso entre etapas puede verse influenciado por factores como la composición del sustrato codigerido, la temperatura, la agitación, la disponibilidad de nutrientes y las condiciones fisicoquímicas del medio (Metcalf & Eddy et al., 2014).

En este sentido, las variaciones de pH observadas, junto con los parámetros cinéticos estimados mediante el modelo de Gompertz, permitieron interpretar la estabilidad y eficiencia del proceso anaerobio, evidenciando que los tratamientos codigeridos no solo favorecieron una mayor producción de metano, sino también una transición más eficiente entre las fases metabólicas del sistema. En conjunto, el ajuste al modelo de Gompertz permitió confirmar que la codigestión anaerobia mejora tanto la cinética de producción de metano como la estabilidad del proceso, reduciendo la fase de adaptación microbiana y aumentando la velocidad de generación de biogás respecto a la digestión individual de los sustratos. Lo anterior evidenciado en la Figura 56.

### 8.6.1 Balance de Carbono y Análisis Integral del Sistema

En un sistema integrado que contempla la valorización de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia y posibles procesos termoquímicos posteriores, resulta fundamental analizar el destino del carbono a lo largo de las distintas etapas. En el presente estudio, el carbono contenido en la fracción orgánica del lodo cervecero y los residuos alimentarios fue parcialmente transformado en metano ($CH_4$) durante la digestión anaerobia, mientras que otra fracción permaneció en el digestato residual en forma de materia orgánica no degradada o biomasa microbiana. Desde la perspectiva del balance de carbono, el metano producido constituye la principal vía de recuperación del carbono biodegradable, al transformarse en una molécula con alto contenido energético. No obstante, el carbono inicial no es completamente mineralizado; una fracción permanece en el sistema, lo que abre la posibilidad de valorización adicional mediante procesos posteriores, como pirólisis para la obtención de biocarbón u otros tratamientos complementarios. Además del análisis volumétrico y cinético realizado mediante el modelo de Gompertz, la producción acumulada de metano puede expresarse en términos energéticos considerando su poder calorífico inferior (~35.8 MJ/m³). Bajo esta conversión, la producción máxima registrada en el sistema (1071.3333 mL) equivale aproximadamente a 0.038 MJ de energía potencial recuperada en condiciones experimentales de laboratorio.

Como se muestra en el Cuadro 6, la energía potencial recuperada osciló entre 0.015 y 0.038 MJ, dependiendo de la proporción de sustratos evaluada. Si bien estos valores corresponden a escala experimental, el análisis energético permite contextualizar la digestión anaerobia no solo como un proceso de estabilización de residuos, sino como una estrategia de recuperación de energía y valorización de carbono bajo un enfoque de economía circular. Este planteamiento fortalece la interpretación integral del sistema y su posible proyección a mayor escala.

### 8.7 Cálculo del Porcentaje de Remoción

De las variables incluidas en los análisis presentados en la Figura 57, los sólidos volátiles presentaron remociones dentro de rangos normales, con valores que oscilaron entre 20 y 60 %. Este comportamiento indica una degradación parcial de la fracción orgánica biodegradable, asociada al consumo de materia orgánica por parte del consorcio microbiano durante la digestión anaerobia. La DQO soluble registró las remociones más elevadas, con porcentajes entre 80 y 100%, a excepción de tres tratamientos donde se observaron procesos de solubilización. En términos de nutrientes, el nitrógeno total y el fósforo total mostraron remociones altas, dentro de intervalos de 60 a 100 %, considerando únicamente los valores positivos menores a 100 %. Las barras de menor magnitud, correspondientes a la DQO soluble, evidencian la ocurrencia de procesos de solubilización en determinados tratamientos. Este fenómeno implica una acumulación de compuestos en la fracción líquida, derivada de la transformación de materia orgánica particulada en compuestos solubles, lo cual es coherente con la dinámica temprana del proceso anaerobio. Durante la primera etapa de la digestión anaerobia, la hidrólisis, la fracción sólida comienza a descomponerse y disolverse en la fase líquida, generando un incremento temporal de la materia orgánica soluble.

Este comportamiento explica que, en algunos casos, la DQO soluble final haya aumentado respecto a la inicial, reflejándose como valores negativos en los porcentajes de remoción. Dichos valores no representan errores analíticos, sino evidencia de la conversión de materia orgánica sólida a soluble, incrementando la fracción disponible para las etapas posteriores del proceso (Batstone et al., 2002). Posteriormente, se observa que las mezclas MR 50:50 y MR 25:75 alcanzaron las mayores eficiencias de remoción de DQO total, DQO soluble y sólidos totales, lo cual indica una conversión efectiva de la materia orgánica hacia metano. Particularmente, las remociones de DQO superiores al 80 % registradas en algunas combinaciones reflejan un alto grado de estabilización de la carga orgánica, valores comparables con los reportados por Atilano et al. (2020) y Gencat (2009) para sistemas anaerobios mixtos. Esto confirma que la codigestión favorece la biodegradabilidad del sustrato y mejora el rendimiento global del proceso. Asimismo, los incrementos observados en los sólidos volátiles y las variaciones en nitrógeno y fósforo total confirman una actividad microbiana sostenida durante el proceso. Estos cambios se asocian tanto al crecimiento de biomasa como a la mineralización de compuestos orgánicos nitrogenados y fosforados. En la mayoría de los tratamientos, los porcentajes de remoción y los rendimientos fueron mayores en aquellos sistemas con mayor proporción de residuos alimentarios. Este comportamiento reafirma el papel de estos residuos como cosustratos altamente biodegradables, capaces de estimular la fermentación anaerobia y potenciar la actividad metanogénica al mejorar la disponibilidad de carbono fácilmente asimilable.

En conjunto, los porcentajes de remoción obtenidos evidencian que la codigestión anaerobia no solo incrementa la producción de metano, sino que también mejora la eficiencia de estabilización de la materia orgánica, favoreciendo la degradación de contaminantes y la conversión de residuos en energía.

### 8.8 Estimación del Rendimiento de Metano

Para aquellas muestras experimentales donde se identificaron procesos de solubilización, se estimó únicamente un rendimiento potencial mínimo de metano. Esto se debe a que, bajo dichas condiciones, la materia orgánica se encontraba predominantemente en forma soluble o parcialmente degradada, sin haber transitado completamente hacia las etapas metanogénicas del proceso. En este sentido, es probable que los residuos codigeridos hayan presentado un descenso de su pH inicial, cercano a 7, hacia valores inferiores, asociado a procesos de solubilización y acidificación. Asimismo, aquellos controles y tratamientos cuyo pH final fue menor a 7 mostraron signos visibles de fermentación y emisión de olores intensificados, características relacionadas con la acumulación de ácidos grasos volátiles durante la acidogénesis, tal como ha sido reportado en la literatura (Speece, 1996). De manera general, en las Figuras 58 y 59, se observó que, a mayor rendimiento de metano, mayor fue la eficiencia de conversión del sustrato removido hacia producción energética. En contraste, rendimientos bajos indicaron que, aunque ocurrió biodegradación de contaminantes, esta no se tradujo proporcionalmente en generación de metano. Este aspecto resulta particularmente relevante desde la perspectiva operativa, ya que permite distinguir entre sistemas orientados principalmente a la remoción de carga orgánica y aquellos con mayor potencial para la recuperación energética, criterio que deberá ser considerado por la empresa INTERNATIONAL en la selección de escenarios de aprovechamiento.

A grandes rasgos, en los Cuadros 16 y 17 se puede observar que el control de lodos por sí solo no mostró un desempeño funcional; hubo baja remoción, escasa producción de metano y cinéticas lentas. Por su parte, el control de alimentos sí evidenció un funcionamiento adecuado, con alta remoción y elevada producción de metano; sin embargo, su digestión anaerobia no representa una necesidad prioritaria, dado que estos residuos suelen destinarse a procesos como la lombricomposta. El tratamiento mezcla con menor proporción de lodo y mayor contenido de alimento presentó muy buena remoción y producción de metano, aunque requirió mayores volúmenes de inóculo para su funcionamiento.

La mezcla en proporción equivalente de lodos y alimentos mostró un comportamiento equilibrado, con buena remoción, producción moderada de metano y tiempos de respuesta estables. Finalmente, la mezcla con mayor proporción de lodo y menor contenido de alimento evidenció remociones y producciones normales, con cinéticas más lentas. El rendimiento de metano, expresado como mL $CH_4$/g de Sv y de DQO soluble removida, evidenció diferencias claras entre controles y tratamientos. El control de lodos presentó rendimientos clasificados como buenos a muy buenos, particularmente en las relaciones 80% – 20% y 90% – 10%, lo que indicó una conversión eficiente de la fracción removida, pese a su baja producción volumétrica total. En contraste, el control de alimentos mostró rendimientos moderados a muy bajos, e incluso nulos en función de la DQO soluble removida en algunas combinaciones, evidenciando que la elevada producción volumétrica no siempre se traduce en eficiencia de conversión del sustrato. El tratamiento con menor proporción de lodo y mayor contenido de alimento registró rendimientos buenos en las combinaciones 70 %–30 % y 80 %–20 %, mientras que la relación 90 %–10 % mostró un desempeño bajo. Por su parte, la mezcla equitativa presentó rendimientos moderados en todas sus combinaciones, reflejando estabilidad operativa. Finalmente, el tratamiento con mayor proporción de lodo presentó rendimientos bajos, con ligera mejora en la relación 90 %–10 %. De manera integral, los mayores rendimientos de metano se obtuvieron en el control de lodos y en la mezcla con menor proporción de lodo bajo condiciones específicas. No obstante, el incremento de residuos alimentarios no siempre se tradujo en mayor eficiencia de conversión. Las mezclas con mayor proporción de residuos alimentarios mostraron mejor biodegradabilidad, mayor generación de metano y cinéticas más favorables, en concordancia con lo reportado por Appels et al. (2008), Del Ángel et al. (2021) y Julio et al. (2016). El control R2 presentó la menor fase de latencia y los valores más altos de Hmax y Rmax según el modelo de Gompertz, mientras que el lodo de filtro prensa de INTERNATIONAL evidenció baja capacidad metanogénica. Los valores extremos de 0 y 100 % en DQO soluble fueron interpretados con cautela, al poder asociarse tanto a límites

analíticos como a procesos de solubilización propios de la hidrólisis, descritos en modelos como ADM1 (Batstone et al., 2002). La ausencia de análisis de metales pesados impidió evaluar el cumplimiento con la NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos, por lo que se recomienda su inclusión en estudios futuros. Asimismo, al comparar los efluentes digeridos con la NOM-001-SEMARNAT-2021, parámetros como DQO soluble, nitrógeno total, fósforo total y sólidos volátiles se mantuvieron por encima de los límites permisibles de descarga directa, sugiriéndose la aplicación de postratamientos como clarificación, decantación u oxidación. Como alternativa de valorización, los residuos digeridos podrían secarse y someterse a procesos de pirólisis para la obtención de biocarbón con potencial aplicación agrícola, siempre que su caracterización fisicoquímica confirme su inocuidad.

En conjunto, los resultados demostraron que la codigestión anaerobia entre lodos industriales y residuos alimentarios genera un efecto sinérgico que incrementa la producción de metano y mejora la remoción de contaminantes. Esto confirma la viabilidad del proceso como alternativa sustentable para el tratamiento de residuos industriales, contribuyendo simultáneamente a la generación de energía renovable y a la reducción de impactos ambientales. Cabe mencionar que los lodos provenientes de los anteriores sistemas de codigestión anaerobia de esta segunda fase corresponden a una matriz más compleja y heterogénea, con elevada humedad, presencia de compuestos orgánicos parcialmente degradados, y una composición variable dependiente del grado de estabilización del proceso anaerobio. Estas características implican requerimientos adicionales de pretratamiento, secado y control operacional, así como un enfoque experimental distinto al planteado originalmente para la evaluación preliminar del biocarbón. Adicionalmente, el enfoque de esta investigación priorizó la valorización de la biomasa microalgal como un subproducto del tratamiento terciario de efluentes, alineándose con esquemas de economía circular y biorrefinería, donde la biomasa generada durante la biorremediación puede ser transformada en materiales de valor agregado.

En este sentido, la producción de biocarbón a partir de biomasa microalgal permitió evaluar de manera puntual la factibilidad técnica de este aprovechamiento, sin comprometer la coherencia metodológica ni los alcances definidos del estudio. Por lo anterior, la investigación se limitó a la producción y acondicionamiento de biocarbón a partir de biomasa microalgal postratada, quedando la evaluación del potencial de los lodos digeridos anaerobiamente como precursores de biocarbón como una línea de investigación futura, dado que su abordaje requiere un diseño experimental específico y un análisis más profundo de variables adicionales. Ahora bien, como fue mencionado previamente, las Fases I y II corresponden a diferentes procesos biotecnológicos, ambas forman parte de una estrategia integral de valorización de residuos industriales generados por la misma empresa. Mientras que la Fase I se enfocó en la remoción de nutrientes y generación de biomasa microalgal para producción de biocarbón a partir de efluentes residuales, la Fase II abordó la transformación energética de lodos y residuos orgánicos mediante digestión anaerobia.

En este contexto, ambos sistemas representan rutas complementarias de aprovechamiento: el proceso microalgal contribuye a la depuración del efluente y producción de biomasa valorizable, mientras que la codigestión anaerobia permite una obtención energética en forma de biogás. Esta integración conceptual responde directamente al objetivo general del estudio, orientado a proponer un esquema de tratamiento y valorización acoplado bajo un mismo enfoque biotecnológico.

# 9. CONCLUSIONES

La presente investigación demostró la viabilidad técnica de implementar un esquema integral de valorización de residuos industriales generados por INTERNATIONAL, mediante la articulación de procesos microalgales, conversión termoquímica de biomasa residual y digestión anaerobia. A diferencia de un tratamiento convencional aislado, el sistema evaluado permite integrar la remoción de contaminantes, la generación de subproductos con potencial de aprovechamiento y la determinación de recuperación energética.

En la Fase I, el cultivo de *Arthrospira platensis* evidenció capacidad de adaptación y crecimiento en efluentes industriales, particularmente en el Rechazo de Ósmosis suplementado, confirmando que estos flujos residuales, considerando que la empresa genera aproximadamente 7,000 L diarios de Rechazo de Ósmosis y 15,000 L diarios de Rechazo de Ultrafiltración, representan una oportunidad real de aprovechamiento biotecnológico. Más allá del crecimiento celular, el sistema microalgal constituye una estrategia potencial de captura biológica de $CO_2$ y transformación de nutrientes residuales en biomasa valorizable, alineándose con esquemas de economía circular y reducción de carga contaminante.

También se confirmó que la biomasa microalgal residual puede ser transformada en biocarbón mediante pirólisis, consolidando un esquema de aprovechamiento total del material generado en el sistema. Este biocarbón presenta potencial como mejorador de suelos o insumo para composta, mientras que la fracción líquida obtenida durante la carbonización podría representar un lixiviado rico en nutrientes susceptible de evaluación como fertilizante. De esta manera, la biomasa deja de ser un subproducto del tratamiento para convertirse en un recurso con valor agregado.

En la Fase II, la codigestión anaerobia de lodo residual de filtro prensa y

residuos alimentarios demostró que la complementariedad de sustratos mejora significativamente la producción de metano en comparación con la digestión individual. Considerando que INTERNATIONAL genera aproximadamente una tonelada diaria de residuos alimentarios y que entre enero y mayo de 2025 se produjeron 6.17 toneladas de lodo de Filtro prensa, la implementación de un sistema de codigestión podría representar una alternativa de recuperación energética relevante. A escala laboratorio, los volúmenes máximos obtenidos (superiores a 1 L acumulado en ciertas mezclas) sugieren que, al escalar el proceso, el biogás generado podría transformarse en energía térmica o eléctrica. Dado que el metano posee un poder calorífico aproximado de 35.8 MJ/m³, la valorización energética del residuo orgánico permitiría reducir costos operativos y dependencia de fuentes externas de energía, siempre que se garantice un control adecuado de la estabilidad microbiológica y del suministro continuo de inóculo anaerobio.

En conjunto, los resultados permiten proponer un modelo conceptual de biosistema acoplado donde los efluentes líquidos son tratados mediante microalgas, los residuos sólidos son valorizados energéticamente por digestión anaerobia y la biomasa resultante es reinsertada en el ciclo productivo como biocarbón. Este enfoque fortalece la transición hacia un esquema de economía circular industrial, donde los residuos no se disponen, sino que se transforman.

No obstante, es importante señalar limitaciones operativas del presente estudio. Todos los ensayos fueron realizados a escala laboratorio, por lo que la extrapolación industrial requiere evaluación de balances energéticos globales, análisis de costos de implementación, estudios de metales pesados en lodos y digestatos conforme a la normativa vigente, así como optimización de parámetros hidráulicos y tiempos de retención a mayor escala. Asimismo, la estabilidad del sistema dependerá del control riguroso de variables como carga orgánica, relación C/N, suministro de inóculo y monitoreo continuo de parámetros fisicoquímicos.

Finalmente, esta investigación no solo confirma la factibilidad técnica de los procesos evaluados, sino que establece una base experimental sólida para el diseño futuro de un esquema integral de tratamiento y valorización de residuos en la industria automotriz, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental, el aprovechamiento de subproductos bajo un mismo enfoque biotecnológico y la recuperación energética.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., et al. (2014). *Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review*. Chemosphere, 99, 19–33. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071

Almahbashi, N. M. Y., Kutty, S. R. M., Ayoub, M., Noor, A., Salihi, I. U., Al-Nini, A., Jagaba, A. H., Al-Dhawi, B. N. S., & Ghaleb, A. A. S. (2021). *Optimization of preparation conditions of sewage sludge based activated carbon*. Ain Shams Engineering Journal. Elsevier. El Cairo, Egipto. 1175–1182. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.007

American Public Health Association. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.)*. American Public Health Association. Washington, D.C. Estados Unidos. s. p.

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). *Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge*. Progress in Energy and Combustion Science. Elsevier. Oxford, Reino Unido. 755–781. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002

Atilano, M. M., Luévano, C. D., García, A., Olivo, D. S., Álvarez, L. H., & García, R. B. (2020). *Evaluation of dissolved and immobilized redox mediators on dark fermentation: Driving to hydrogen or solventogenic pathway*. Bioresource Technology. Elsevier. Ámsterdam, Países Bajos. 123981. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123981

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). *Anaerobic digestion model no. 1 (ADM1)*. IWA Publishing. Londres, Reino Unido. https://doi.org/10.2166/9781780402369

Bennett, A., & Bogorad, L. (1973). *Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga*. The Journal of Cell Biology. Nueva York, Estados Unidos. 58(2), 419–435. https://doi.org/10.1083/jcb.58.2.419

Bennouna, C. (2022). *Espirulina: sus propiedades y métodos de cultivo*. Synoxis Algae. París, Francia. Consultado en línea 21 enero 2024.

Bligh, G. E., & Dyer, J. W. (1959). *A rapid method of total lipid extraction and purification*. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology. Toronto, Canadá. 37, 911–917. https://doi.org/10.1139/o59-099

Candela Orduz, R. D. (2015). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones*. *Una revisión bibliográfica.* Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Bogotá, Colombia. Tesis de grado.

Carrillo-Reyes, J., Buitrón, G., Moreno-Andrade, I., Tapia-Rodríguez, A. C., Palomo-Briones, R., Razo-Flores, E., Aguilar-Juárez, O., Arreola-Vargas, J., Bernet, N., Braga, A. F. M., Braga, L., Castelló, E., Chatellard, L., Etchebehere, C., Fuentes, L., León-Becerril, E., Méndez-Acosta, H. O., Ruiz-Filippi, G., Tapia-Venegas, E., Trably, E., Wenzel, J., & Zaiat, M. (2019). *Standardized protocol for determination of biohydrogen potential*. MethodsX. Elsevier. Ámsterdam, Países Bajos. 100754. https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100754

Chaiklahan, R., Chirasuwan, N., & Bunnag, B. (2012). *Stability of phycocyanin extracted from Spirulina platensis under various conditions.* International Food Research Journal. Universiti Putra Malaysia Press. Serdang, Malasia. pp. 819–826.

Chang, Y.-M., Tsai, W.-T., & Li, M.-H. (2015). *Chemical characterization of char derived from slow pyrolysis of microalgal residue*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Elsevier. Ámsterdam, Países Bajos. 88–93. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.02.004

Chavan, R., & Mutnuri, S. (2018). *Tertiary treatment of domestic wastewater by Spirulina platensis integrated with microalgal biorefinery*. Biofuels. Taylor & Francis. Londres, Reino Unido. 33–44. https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1296482

Converti, A., Casazza, A. A., Ortiz, E. Y., Perego, P., & Del Borghi, M. (2009). *Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of Nannochloropsis oculata and Chlorella vulgaris for biodiesel production*. Chemical Engineering and Processing: Process

Intensification. Elsevier. Ámsterdam, Países Bajos. pp. 1146–1151. https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.03.006

Del Ángel, Y. A., Álvarez, L. H., García, R. B., Carrillo, J., García, A., & Meza, E. R. (2021). *Co-digestion of corn (nejayote) and brewery wastewater at different ratios and pH conditions for biohydrogen production*. International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier. Oxford, Reino Unido. 27422–27430. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.053

Eriksen, N. T. (2008). *Production of phycocyanin—A pigment with applications in biology, biotechnology, foods and medicine*. Applied Microbiology and Biotechnology. Springer. Berlín, Alemania. pp. 1–14. https://doi.org/10.1007/s00253-008-1542-y

Ferreira, C. de F., Almeida, C. C., & Adilson, J. (2022). *Microalgae bioremediation and $CO_2$ fixation of industrial wastewater*. ScienceDirect. Elsevier. Ámsterdam, Países Bajos.

Gonzáles, A. (2016). *Cultivos de microalgas a gran escala: sistemas de producción. Cajamar*. Almería, España. Consultado en línea 6 abril 2024.

Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., & Darzins, A. (2008). *Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances*. The Plant Journal. Wiley-Blackwell. Oxford, Reino Unido. pp. 621–639. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03492.x

Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). *Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier. Oxford. Reino Unido. pp. 1966–2005. https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.012

Julio, I., Peláez, C., & Molina, F. (2016). *Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos*. SciELO. Bogotá, Colombia.

Jung, K.-W., Hwang, M.-J., Jeong, T.-U., & Ahn, K.-H. (2015). *A novel approach for preparation of activated biochar from marine macroalgae by chemical activation with phosphoric acid*. Bioresource Technology, 197, 271–276.

https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.050

Liou, T.-H. (2010). *Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation*. Chemical Engineering Journal, 158(2), 129–142. https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.12.016

López, E. P. (2013). *Superalimento para un mundo en crisis: Spirulina a bajo costo*. Idesia. Universidad de Tarapacá. Arica, Chile.

López, L. A., Ramírez, A., Olivo, D. S., Díaz, J., & Nava, N. (2024). *Low-temperature solubilization of carbohydrates, lipids, and proteins in livestock waste for anaerobic methane production*. Biomass Conversion and Biorefinery. Springer. Berlín, Alemania. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04567-3

López, R., García, D., Bolado, S., Jiménez, J. J., Lai, F. Y., Golovko, O., Ferrero, P. G., Ahrens, L., Wiberg, K., & Muñoz, R. (2019). *Photobioreactors based on microalgae-bacteria and purple phototrophic bacteria consortia*. Elsevier. Ámsterdam, Países Bajos. Consultado en línea 21 mayo 2024.

Mahmoud, M., Mahmoud, Y., & Piercey, M. (2016). *Role of pH on antioxidants production by Spirulina (Arthrospira) platensis*. Elsevier España. Madrid. España.

Markou, G., Angelidaki, I., & Georgakakis, D. (2014). *Microalgal carbohydrates: An overview of the factors influencing carbohydrate production, and of main bioconversion technologies for production of biofuels*. Applied Microbiology and Biotechnology. Springer. Berlín. Alemania. pp. 631–645. https://doi.org/10.1007/s00253-013-5407-0

Markou, G., & Georgakakis, D. (2011). *Cultivation of filamentous cyanobacteria (blue-green algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review.* Bioresource Technology. Elsevier. Ámsterdam. Países Bajos. pp. 9453–9462. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.048

Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource*

*recovery (5.ª ed.)*. McGraw-Hill Education. Nueva York, Estados Unidos.

Molina, S., & Rojas, C. (2015). *Rol de los biosistemas forestales en el desarrollo dentro de un marco de cambio climático*. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. Consultado en línea 29 abril 2024.

Moreno, P. J. (2010). *Evaluación del crecimiento y carotenogénesis de cuatro cepas de microalgas marinas*. Universidad de Sonora. Hermosillo, México. Consultado en línea 29 abril 2024.

Nava, N., Del Ángel, O. A., Atenodoro, J., & López, L. A. (2021). *Effect of thermal and acid pre-treatment on increasing organic loading rate of anaerobic digestion of coffee pulp for biogas production*. Springer. Berlín, Alemania. https://doi.org/10.1007/s13762-020-03073-9

Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011). *Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production*. Bioresource Technology. Elsevier. Ámsterdam. Países Bajos. pp. 35–42. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.158

Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*. Blackwell Science Ltd. Oxford, Reino Unido.

Rockhati, N., Prasetyaningrum, A., Aji, R., & Hamada, N. (2021). *The use of chitosan as non-toxic flocculant for harvesting microalgae Spirulina sp*. IOP Publishing. Bristol, Reino Unido. https://doi.org/10.1088/1755-1315/755/1/012045

Ruiz García, A. I. (2024). *Cultivo de Arthrospira maxima para producción y extracción de C-ficocianina y su adición en alimentación animal y humana*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía. General Escobedo, Nuevo León, México, 1.

Saka, C., Uçar, S., & Karadeniz, A. (2020). *Spirulina microalgal strain as an efficient metal-free catalyst*. International Journal of Energy Research. Wiley. Londres. Reino Unido. pp. 9784–9797. https://doi.org/10.1002/er.5553

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). *NOM-004-SEMARNAT-2002*. Diario Oficial de la Federación. México. México. s. p.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021*. Diario Oficial de la Federación. México. México. s. p.

Speece, R. E. (1996). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*. Archae Press. Nashville, Estados Unidos.

Tayebati, H., Pajoum Shariati, F., Soltani, N., & Sepasi Tehrani, H. (2020). *The effect of different light variables on Spirulina growth and its component*. International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2020), Fouman, Irán.

Vonshak, A. (1997). *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*. Taylor & Francis Ltd. Londres, Reino Unido.

# 11. ANEXOS

Como recomendación, se invita a la realización de algunos estudios de escalamiento piloto que permitan validar el desempeño de los sistemas microalgales y de codigestión anaerobia bajo condiciones operativas cercanas a la realidad industrial, considerando volúmenes continuos de alimentación, tiempos de retención hidráulica y balances energéticos globales. La transición de escala laboratorio a escala piloto permitirá determinar la viabilidad técnica, económica y operativa del esquema propuesto.

Para el sistema microalgal, se recomienda evaluar la captura neta de $CO_2$ y desarrollar estudios de optimización en condiciones semicontinuas o continuas, así como explorar la integración directa con corrientes gaseosas industriales. De igual manera, sería pertinente analizar la factibilidad económica de la producción de biomasa y metabolitos de valor agregado bajo escenarios reales de operación. A su vez, se sugiere profundizar en la caracterización fisicoquímica del biocarbón obtenido, incluyendo análisis de área superficial, composición elemental y capacidad adsorbente, así como evaluar el potencial agronómico del material y del lixiviado generado durante la carbonización.

En el caso de la digestión anaerobia, se sugiere evaluar otros de los diferentes tipos de lodos residuales generados por INTERNATIONAL, con excepción del ya conocido lodo de Filtro prensa, como, por ejemplo: lodo de Saco, lodo de Pintado, lodo vaciado pre-reactor y lodo negro E-Coat; a estos se les puede observar en la Figura 60, así como caracterizar su contenido de metales pesados y compuestos potencialmente inhibidores, con el fin de determinar su aptitud para procesos de valorización energética y cumplimiento normativo. Asimismo, resulta fundamental realizar un análisis energético detallado que relacione la producción potencial de biogás con su conversión a energía térmica o eléctrica, incluyendo estimaciones de recuperación y eficiencia del sistema.

***Figura 60.*** Identificación de cuatro diferentes tipos de lodos residuales provenientes de la industria automotriz. a) lodo de Saco b) lodo de Pintado c) lodo vaciado Pre-reactor d) lodo negro E-Coat.

Finalmente, se recomienda desarrollar un estudio integral de análisis de ciclo de vida (ACV) y evaluación costo-beneficio que permita determinar el impacto ambiental real del sistema acoplado y su contribución efectiva a la economía circular dentro de la industria automotriz.