



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TRABAJO DE TITULACIÓN COMO REQUISITO PREVIO

PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERA AMBIENTAL

**PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO A PARTIR DE
MICROALGAS MEDIANTE CAPTACIÓN DE DIÓXIDO DE
CARBONO**

AUTORA

ZAMBRANO CABAL MELANIE DOMÉNICA

TUTOR

BLGO. SANTOS PINAGORTE JAIME OLIVER, MSc.

GUAYAQUIL, ECUADOR

2026



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL TUTOR

El suscrito, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de Tutor, certifico que el presente trabajo de titulación: “PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO A PARTIR DE MICROALGAS MEDIANTE CAPTACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO”, realizado por la estudiante ZAMBRANO CABAL MELANIE DOMÉNICA; con cédula de identidad N° 0958787939 de la carrera INGENIERÍA AMBIENTAL, Unidad Académica Guayaquil, ha sido orientado y revisado durante su ejecución; y cumple con los requisitos técnicos y legales exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto, se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

BLGO. SANTOS PINAGORTE JAIME OLIVER, MSc.
Tutor

Guayaquil, 23 de abril del 2026



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Los abajo firmantes, docentes designados por el H. Consejo Directivo como miembros del Tribunal de Sustentación, aprobamos la defensa del trabajo de titulación: “PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO A PARTIR DE MICROALGAS MEDIANTE CAPTACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO”, realizado por la estudiante ZAMBRANO CABAL MELANIE DOMÉNICA, el mismo que cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador.

Atentamente,

BLGO. MOLINA VILLAMAR JOHN, PhD.
PRESIDENTE

ING. VARGAS GUILLÉN PABLO, M.Sc.
EXAMINADOR PRINCIPAL

BLGA. SOTO QUINTANA LUZ, PhD.
EXAMINADOR PRINCIPAL

BLGO. SANTOS PINARGOTE JAIME, M.Sc.
EXAMINADOR SUPLENTE

Guayaquil, 23 de abril del 2026

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios, por guiar cada uno de mis pasos.

A mis padres por el apoyo en todo ámbito brindado a lo largo de mi vida, su amor incondicional y por disfrutar mis logros, sepan que también son suyos.

A mi hermano por siempre darme su ayuda, amor y comprensión en todo momento.

A mi tía y abuelo por sus palabras continuas de aliento y cariño; a mi abuela, quien no se encuentra físicamente, sin embargo, me da las fuerzas necesarias para culminar mis metas.

A mi enamorado, mi amor, por haber concluido a su lado esta etapa, por su amor, paciencia, y sostener mi mano siempre, esperando seguir creciendo juntos.

A mi mascota, por su fiel compañía.

Con mucho amor dedicado a ellos, quienes son mi familia, mi soporte y mi motivación.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la UAE, por abrirme sus puertas para mi formación como profesional, y por permitirme realizar mi proyecto en sus instalaciones.

Al CENAIM, por su donación para hacer posible esta investigación.

A mi tutor de tesis, por sus enseñanzas, por su ayuda cada que lo necesitaba, por su guía y paciencia durante este proceso.

Gracias a Dios, por permitirme terminar satisfactoriamente este trayecto.

A mi familia por estar presente en cada logro de mi vida; a mi enamorado por prestar su tiempo y ayuda siempre.

A mi compañero de laboratorio, por brindar su tiempo y esfuerzo, en el montaje de la estructura del experimento.

A mis amigos por su compañía y colaboración.

Autorización de Autoría Intelectual

Yo ZAMBRANO CABAL MELANIE DOMENICA, en calidad de autora del proyecto realizado, sobre “PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO A PARTIR DE MICROALGAS MEDIANTE CAPTACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO.” para optar el título de INGENIERA AMBIENTAL, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contienen esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor(a) me correspondan, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8; 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Guayaquil, abril 23 de 2026

ZAMBRANO CABAL MELANIE DOMENICA
C.I. 0958787939

RESUMEN

La investigación evalúa la captación de CO₂ industrial y la producción de biohidrógeno de un sistema de cultivo de microalgas por medio de condiciones controladas en laboratorio para el establecimiento de un modelo escalable a nivel industrial. Se fundamenta en el potencial biotecnológico de las microalgas como organismos fotosintéticos capaces de fijar carbono y generar biocombustibles de tercera generación. El estudio experimental se desarrolló bajo condiciones controladas de laboratorio a través del cultivo de *Nannochloropsis sp.*, *Chlorella sp.* y *Dunaliella salina* en fotobiorreactores, comparando tratamientos con aireación y con dosificación de CO₂. Se determinaron indicadores de tasas de captación de dióxido de carbono, la producción de biohidrógeno y su relación, aplicando análisis estadísticos descriptivos e inferenciales; análisis de costo- beneficio para estimar la viabilidad del sistema. Los resultados mostraron un incremento considerable en la captación de CO₂ y en la producción de biohidrógeno en los tratamientos con suministro de CO₂, observándose diferencias estadísticamente significativas entre condiciones experimentales. Se concluye que el sistema de cultivo microalgal presenta viabilidad a escala de laboratorio, con potencial de escalabilidad industrial teniendo en cuenta factores como la optimización del diseño y del sistema, constituyéndose en una alternativa prometedora para la mitigación de emisiones y la generación de energía limpia.

Palabras clave: biohidrógeno, captura de CO₂, escalabilidad industrial, fotobiorreactores, microalgas

ABSTRACT

This study evaluates industrial CO₂ capture and biohydrogen production using a microalgae cultivation system under controlled laboratory conditions, with the aim of developing a model with potential for industrial-scale application. The research is based on the biotechnological potential of microalgae as photosynthetic organisms capable of carbon fixation and the production of third-generation biofuels.

The experimental phase was conducted through the cultivation of *Nannochloropsis sp.*, *Dunaliella salina*, and *Chlorella sp.* in photobioreactors, comparing treatments with air aeration and with direct CO₂ supplementation. Indicators related to carbon dioxide capture rates and biohydrogen production, as well as their relationship, were determined using descriptive and inferential statistical analyses. In addition, a cost–benefit assessment was performed to estimate the feasibility of the proposed system.

The results showed a considerable increase in both CO₂ capture and biohydrogen production in treatments supplied with CO₂, with statistically significant differences observed between experimental conditions. These findings indicate that the microalgal cultivation system is feasible at the laboratory scale and demonstrates potential for industrial scalability, particularly when factors such as system design and operational optimization are considered.

Overall, this approach represents a promising strategy for reducing carbon emissions while simultaneously generating clean energy.

Keywords: *biohydrogen, CO₂ capture, industrial scalability, photobioreactors, microalgae.*

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
Autorización de Autoría Intelectual.....	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes del problema.....	1
1.2 Planteamiento y formulación del problema	2
1.2.1 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación de la investigación	4
1.4 Delimitación de la investigación	6
1.5 Formulación del problema.....	7
1.6 Objetivo general	7
1.7 Objetivos específicos	7
1.8 Hipótesis o idea a defender.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Estado del arte	9

2.2 Bases científicas y teóricas de la temática.....	13
2.2.1 Microalgas.....	13
2.2.2 Producción de biohidrógeno	17
2.2.3 Viabilidad y escalabilidad de sistemas algales en las industrias	19
2.3.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)	21
2.3.2 Código Orgánico del Ambiente (2017)	22
2.3.3 Ley Orgánica de Eficiencia Energética (2019)	23
3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 Enfoque de la investigación	24
3.1.1 Tipo y alcance de la investigación.....	24
3.1.2Diseño de investigación	25
3.3 Metodología	25
3.2.1 Variables	25
3.2.2 Matriz de operacionalización de variables.....	25
3.2.3 Tratamientos	26
3.2.4 Diseño experimental	26
3.2.5 Recolección de datos	27
3.3.1 Análisis estadístico.....	33
4. RESULTADOS	37
4.1 Determinación de las tasas de captación de CO ₂ del cultivo, con la adición de concentraciones de CO ₂ , por medio de análisis de laboratorio	37
4.1.1 Captación de CO ₂ en Nannochloropsis sp.	37
4.1.2 Captación de CO ₂ en Dunaliella salina	40
4.1.3 Captación de CO ₂ en Chlorella sp.....	42

4.2 Identificación de la eficiencia de la producción de biohidrógeno a partir del cultivo, por medio del análisis de la relación entre captación de CO ₂ y la cantidad de biohidrógeno generado	45
4.3 Estimación de la viabilidad del sistema de cultivo de microalgas para su escalabilidad industrial	46
4.4 Análisis estadístico.....	51
4.4.1 t de Student pareada.....	51
4.4.3 ANOVA.....	52
4.4.5 Prueba de homogeneidad de varianzas.....	55
4.4.7 Gráfico de Cajas y Bigotes.....	57
5. DISCUSIÓN	59
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
6.1 Conclusiones.....	62
6.2 Recomendaciones.....	62
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXOS	74

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N°1. Adquisición de microalgas para el estudio	74
Anexo N°2. Preparación de medio de cultivo	75
Anexo N°3. Materiales empleados bajo proceso de esterilización	75
Anexo N°4. Inoculación de cepas en FBR y masificación	76
Anexo N°5 Presentación de tratamientos y controles de cepas	78
Anexo N°6. Método de recolección de gas	78
Anexo N°7. Inyección de dióxido de carbono a sistema microalgal	79
Anexo N°8. Matriz de operacionalización de Variables Independientes	80
Anexo N°9. Matriz de operacionalización de Variables Dependientes	80

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula de fotosíntesis.....	30
Ecuación 2. Fórmula de producción H ₂	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Ubicación	7
Figura 2. Diagrama de flujo: Métodos y Técnicas	29
Figura 3. Efecto del CO ₂ en el crecimiento celular microalgal en comparación con control con aireación	38
Figura 4. Crecimiento celular de control de <i>Nannochloropsis</i> sp., bajo aireación	39
Figura 5. Crecimiento celular de <i>Nannochloropsis</i> sp., (Aireación vs. Dosificación de CO ₂)	39
Figura 6. Efecto del CO ₂ en el crecimiento celular microalgal en comparación con control con aireación	41
Figura 7. Crecimiento celular de control de <i>Dunaliella</i> salina, bajo aireación ..	41
Figura 8. Crecimiento celular de <i>Dunaliella</i> salina, (Aireación vs. Dosificación de CO ₂)	42
Figura 9. Efecto del CO ₂ en el crecimiento celular microalgal en comparación con control con aireación	43
Figura 10. Crecimiento celular de control de <i>Chlorella</i> sp., bajo aireación.....	44
Figura 11. Crecimiento celular de <i>Chlorella</i> sp., (Aireación vs. Dosificación de CO ₂)	44
Figura 12. Resultados de crecimiento celular de tratamientos evaluados	53
Figura 13. Distribución del porcentaje de crecimiento celular (%) en los tratamientos evaluados	58
Figura 14. Distribución de la producción de biohidrógeno de los tratamientos evaluados.....	58
Figura 15. Microalgas suministradas por el CENAIM.....	74

Figura 16. Adquisición de microalgas suministradas por el CENAIM.....	74
Figura 17. Elaboración de medio de cultivo para las microalgas	75
Figura 18. Evidencia de cantidad de microalgas inicial (30 mL) por cepa.....	75
Figura 19. Esterilización de materiales	75
Figura 20. Fase de masificación bajo condiciones controladas de laboratorio	76
Figura 21. Proceso de masificación	76
Figura 22. Crecimiento celular visto bajo microscopio	76
Figura 23. Resiembra de las cepas de microalgas en FBR	77
Figura 24. Tratamientos y controles.....	78
Figura 25. Elaboración de método de recolección de gas	78
Figura 26. Ajuste del sistema previo a dosificación de dióxido de carbono	79
Figura 27. Dosificación de dióxido de carbono al sistema	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos Experimentales.....	26
Tabla 2. Soluciones para medio de cultivo microalgal	31
Tabla 3. Esquema de ANOVA.....	35
Tabla 4. Captación de dióxido de carbono: Nannochloropsis sp.....	38
Tabla 5. Captación de dióxido de carbono: Dunaliella salina	40
Tabla 6. Captación de dióxido de carbono: Chlorella sp.	43
Tabla 7. Producción de Biohidrógeno: Nannochloropsis sp.....	45
Tabla 8. Producción de Biohidrógeno: Dunaliella salina	46
Tabla 9. Análisis Costo- Beneficio de sistema de cultivo de microalgas (Escala de laboratorio)	47
Tabla 10. Análisis Costo- Beneficio de sistema de cultivo de microalgas (Escala Piloto)	49
Tabla 11. Resultados de prueba t de Student pareada para la captación de CO ₂ antes y después de suministro de CO ₂ en las microalgas.....	51
Tabla 12. Resultados de prueba t de Student pareada para la producción de biohidrógeno antes y después de suministro de CO ₂ en las microalgas.....	52
Tabla 13. Resultados de crecimiento celular de tratamientos evaluados.....	52
Tabla 14. Análisis de Varianza de Tratamientos	54
Tabla 15. Residuos de Variable de Crecimiento Celular.....	54
Tabla 16. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks	55
Tabla 17. Residuos Absolutos de variable de Crecimiento Celular.....	55
Tabla 18. Prueba de Homogeneidad de varianzas	56
Tabla 19. Aplicación de Prueba de Tukey.....	57

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del problema

El calentamiento global, causado principalmente por la carga de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂) representa uno de los mayores desafíos ambientales de la actualidad. De acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (2024), las actividades antropogénicas, como la quema de combustibles fósiles y procesos industriales, han incrementado los niveles de CO₂ en la atmósfera a niveles alarmantes, lo que acelera el calentamiento global y afecta gravemente a los ecosistemas.

En la actualidad una de las formas indagadas para la captura de CO₂ es la utilización de microorganismos fotosintéticos que posteriormente lo transforma en materia orgánica. Este proceso natural durante siglos ha logrado tener las concentraciones de dióxido de carbono adecuadas para la producción de vida en el planeta. Teniendo en cuenta el potencial de las microalgas, los científicos estudian diferentes tipos de algas y microorganismos fotosintéticos para reducir el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera, desde la fuente que lo emite o el aire (Castillo, 2020).

Según Dumur, Filalli, López, Pareau y Tebbani (2020), en países desarrollados la captura de carbono mediante organismos fotosintéticos es una opción factible para aminorar la contaminación ocasionada por los gases de efecto invernadero. Este mecanismo permite extraer el CO₂ emitido por chimeneas industriales y almacenarlo en diversos sumideros, como suelos, bosques o biomasa, a través de procesos biológicos como la fotosíntesis. Las microalgas, organismos unicelulares eucarióticos, destacan por realizar fotosíntesis ficorremediación, eliminando o transformando contaminantes presentes en medios líquidos y gaseosos.

Países de América Latina y el Caribe, como México, Argentina, Chile, Ecuador y Brasil, se encuentran localizados en zonas con radiación solar idónea para la cosecha de microalgas y poseen un potencial fundamental para posicionarse, como productores de biocombustibles (Monteiro, 2010).

Según un estudio realizado en Colombia por Castiblanco y Sandoval, (2022), el desarrollo del biohidrógeno como fuente de energía alternativa ha tenido grandes

beneficios económicos y ambientales. Se puede obtener a raíz de varios microorganismos, incluidas las microalgas verdes. Existen limitantes a nivel técnico y económico que dificultan la aplicación del biohidrógeno a un grado industrial, el avance en ingeniería y el diseño de biorreactores ofrecen un panorama positivo para la mejora de los procesos de producción de biohidrógeno en el futuro.

En Ecuador, se han desarrollado investigaciones orientadas a la producción de biocombustibles a base de microalgas. Entre ellas, destaca el proyecto “Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal, *Chlorella sp.*, empleando fotobiorreactores”, cuyo objetivo es evaluar la capacidad de fijación de CO₂ para la generación de combustibles de tercera generación mediante el cultivo de *Chlorella sp.* en fotobiorreactores a escala piloto.

Esta iniciativa, patrocinada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo y respaldada por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EE. UU., también ha analizado la biomasa microalgal de la laguna Limoncocha como materia prima, identificando al consorcio *Chlorella/Monoraphidium contortum sp.* como el de mayor contenido lipídico y mejor rendimiento en la obtención de biocombustibles (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2022).

Aunque estos avances han generado información relevante sobre la captura de carbono y la producción de biodiésel, la obtención de biohidrógeno a partir de microalgas, sigue siendo un campo poco desarrollado en el país. Considerando la disponibilidad de cepas nativas adaptadas a las condiciones locales y la necesidad de alternativas energéticas sostenibles que mitiguen el impacto ambiental de los combustibles fósiles, se hace necesario impulsar investigaciones que integren la captura biológica de CO₂ con la producción de biohidrógeno, impulsando así a la diversificación de la matriz energética y a los compromisos climáticos nacionales.

1.2 Planteamiento y formulación del problema

1.2.1 Planteamiento del problema

El sistema energético global debe avanzar hacia una transformación completa que permita su descarbonización, con el objetivo de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y aportar a la mitigación del cambio climático. Aunque los combustibles fósiles tradicionales han sido una fuente clave

para satisfacer la creciente demanda mundial de energía primaria, su consumo no resulta sostenible por la rápida acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, la cual ha excedido el límite “peligrosamente alto” de 450 ppm de CO₂.

Esta situación plantea numerosos retos ambientales, entre ellos el calentamiento global, pérdida de diversidad de flora y fauna, retroceso de los glaciares y aumento del nivel del mar, etc. Los biocombustibles, como el bioetanol, biodiésel o biohidrógeno, obtenidos por medio de materias primas renovables, se consideran la sustitución de combustibles no renovables (Castiblanco y Sandoval, 2022).

En Ecuador, aun cuando es un país exportador de petróleo, tiene una fuerte dependencia en la importación de derivados. Se estima que las reservas de petróleo podrían agotarse hacia el año 2035, lo que agrava la vulnerabilidad energética del país (Cullispuma, 2021). Aunque el 85 % de la generación eléctrica nacional proviene de energías renovables, principalmente hidroeléctrica (Gracia, 2021), la investigación y el desarrollo de biocombustibles, y particularmente del biohidrógeno, se encuentran rezagados.

Asimismo, dentro del país se distinguen diferentes áreas que contribuyen con grandes emisiones de dióxido de carbono, particularmente el sector industrial, específicamente la producción cementera generando grandes emisiones del mismo; y además es responsable hasta del 8% de las emisiones globales de los gases de efecto invernadero (Sax, 2024).

Esta falta de estudios sobre el biohidrógeno en el contexto ecuatoriano limita la posibilidad de diseñar políticas públicas, atraer inversiones y promover proyectos piloto que diversifiquen la matriz energética. La transición hacia energías más limpias no solo es una necesidad por la reducción de emisiones, sino también por la seguridad energética, la soberanía y la resiliencia ante la crisis climática y la volatilidad de los mercados internacionales (Pascual y Sanz, 2020).

Se entiende que la ausencia de desarrollo en biohidrógeno representa una oportunidad desaprovechada para Ecuador, su implementación podría colaborar con la mitigación del cambio climático, a la generación de empleo, al avance tecnológico y a una mayor independencia energética. Por ello, es prioritario evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental considerando los recursos y condiciones propias del país.

1.3 Justificación de la investigación

En el marco del esfuerzo global por mitigar el cambio climático, la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles se ha convertido en una prioridad. Los biocombustibles de tercera generación, como el biohidrógeno producido por microalgas, representan una solución innovadora que combina la reducción de emisiones de CO₂ con el aprovechamiento de fuentes renovables. Este estudio busca evaluar el potencial de las microalgas *Nannochloropsis sp.*, *Chlorella sp.* y *Dunaliella salina* para capturar dióxido de carbono y producir biohidrógeno en condiciones controladas de laboratorio, con el objetivo de desarrollar un modelo escalable a nivel industrial.

Estas microalgas poseen características complementarias que las convierten en candidatas ideales: *Nannochloropsis sp.*, rica en lípidos, es prometedora para la producción de biodiésel, lo que diversifica el sistema y maximiza su rentabilidad; *Chlorella sp.* sobresale por su potencial de producir biohidrógeno a través del metabolismo heterotrófico, ofreciendo una solución directa para generar energía limpia; mientras que *Dunaliella salina*, se adapta a ambientes extremos de temperatura y salinidad, reduce los costos operativos al no requerir recursos como agua dulce o fertilizantes adicionales.

Es fundamental desarrollar procesos industriales que sean sostenibles y renovables, considerando que representan uno de los mayores retos globales que enfrenta la humanidad. Los métodos de producción convencionales resultan insostenibles debido a su dependencia de materias primas no renovables, además de generar elevadas emisiones de gases de efecto invernadero, flujos secundarios tóxicos y desechos que impactan negativamente en el medio ambiente (Pakshirajan y Shinharoy, 2020). La adopción de un enfoque de captura biológica de carbono utilizando microalgas ayuda a reducir la huella de carbono y a generar bioenergía, posicionándose como una alternativa neutra en emisiones de CO₂ frente a los combustibles fósiles (Anumudu, Miri y Onyeaka, 2021).

Los biocombustibles se dividen en tres tipos principales: los de primera generación, basados en cultivos alimentarios y oleaginosos a través de procesos mecánicos, químicos y biológicos; combustibles de segunda generación, dados por cultivos lignocelulósicos no comestibles, desechos orgánicos y residuos que sean ricos en carbohidratos con el uso de microorganismos; y los de tercera generación,

derivados de microalgas por la conversión de energía solar en energía química gracias a la fotosíntesis; incluyendo el biodiésel, y el biohidrógeno, que ha surgido como una alternativa reciente (Castiblanco y Sandoval, 2022).

El biohidrógeno presenta varias ventajas frente a los combustibles convencionales, como una eficiencia de conversión, reciclabilidad, naturaleza no contaminante y la capacidad de generar grandes cantidades de energía. Además, puede ser empleado en motores de combustión interna o en pilas de combustible para producción de electricidad. Las microalgas, presentan un gran alcance de acumulación de lípidos y su eficacia fotosintética, con una conversión del 3% al 8% de la energía solar en biomasa, en comparación con el 0,5% observado en las plantas terrestres. También pueden ser utilizadas como materia prima para la fabricación de biocombustibles (Castiblanco y Sandoval, 2022).

Las microalgas tienen ventajas, frente a otros cultivos. Crecen 5 a 10 veces más rápido que las plantas terrestres y pueden ser cultivadas en áreas no agrícolas, incluso en aguas residuales ricas en nutrientes, sin competir por agua dulce. Además, predominan por su capacidad para capturar CO₂ atmosférico. Por estas razones, tienen un gran potencial tanto para la producción de biohidrógeno como para el desarrollo de sistemas eficientes de captura de carbono. Sin embargo, entre sus limitaciones destacan las bajas tasas de producción, la baja eficiencia en la conversión del sustrato y la acumulación de metabolitos intermedios ricos en ácidos generados durante el proceso acidogénico (Castiblanco y Sandoval, 2022).

Las actividades económicas del país que mantienen un alto impacto ambiental incluyen el área de la salud, industria manufacturera y explotación de minas y canteras, con porcentajes de impacto de 58,6%, 52,9% y 51,9%, correspondientemente (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2020). Estas actividades generan elevadas emanaciones de gases de efecto invernadero, sumando al deterioro ambiental y al cambio climático.

Nacionalmente, las emisiones de gases de efecto invernadero, provienen principalmente del dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), los cuales se contabilizan en su equivalente de CO₂ para medir el impacto total. Además, evolución de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el país presenta una tendencia preocupante, especialmente en relación con el dióxido de carbono (Ministerio de Energías y Minas, 2023).

Entre los sectores de mayor contribución destacan el transporte, el manufacturero y el industrial, debido a sus procesos intensivos en energía (Guillén y León, 2020). Por otro lado, la explotación minera y de canteras también presenta emisiones directas por el uso de maquinaria y explosivos, y con emisiones indirectas debido a la deforestación y alteración de ecosistemas. Estos sectores, por su magnitud y relevancia en la economía, constituyen un punto crítico para implementar tecnologías sostenibles de mitigación, como los sistemas de captura de CO₂ mediante microalgas, que no solo reducen las emisiones, sino que generan subproductos valiosos como lípidos y biohidrógeno, útiles en la transición energética.

Por lo tanto, se emularán las condiciones del sector industrial, para evaluar como la captación de dióxido de carbono y producción de biohidrógeno pueden ser viables para el área.

Esta investigación no solo aporta al avance teórico-científico al identificar las condiciones óptimas de cultivo de microalgas para maximizar la productividad y eficiencia de conversión de CO₂, superando limitaciones como las bajas tasas de producción, sino que también ofrece un modelo práctico, sostenible y escalable.

Por consiguiente, favorece al desarrollo sostenible de Ecuador, la mitigación del cambio climático y la transición hacia una matriz energética más limpia, alineándose con los compromisos globales de descarbonización.

1.4 Delimitación de la investigación

- **Espacio:** La investigación se llevó a cabo en los laboratorios de microbiología de la Universidad Agraria del Ecuador, donde se realizaron los experimentos en condiciones controladas para evaluar el potencial de las microalgas seleccionadas en la captura de CO₂ y la producción de biohidrógeno.

- **Tiempo:** 6 meses es el período de tiempo que tomó el desarrollo del trabajo, desde el mes de septiembre del 2025, hasta febrero del 2026.

- **Población:** Dirigido a la comunidad científica, las industrias con altas emisiones de CO₂ en Ecuador y organismos gubernamentales interesados en fomentar alternativas sostenibles para la transición energética y la mitigación del cambio climático.

Figura 1

Mapa de Ubicación

Elaborado por: La Autora, 2026

1.5 Formulación del problema

¿Cómo establecer un modelo escalable a nivel industrial basado en la captación de dióxido de carbono y producción de biohidrógeno utilizando un sistema de cultivo de microalgas bajo condiciones controladas de laboratorio?

1.6 Objetivo general

Evaluar la captación de CO₂ industrial y la producción de biohidrógeno de un sistema de cultivo de microalgas por medio de condiciones controladas en laboratorio para el establecimiento de un modelo escalable a nivel industrial.

1.7 Objetivos específicos

- Determinar las tasas de captación de CO₂ del cultivo, con la adición de concentraciones de CO₂, por medio de análisis de laboratorio.
- Identificar la eficiencia de la producción de biohidrógeno a partir del cultivo, por medio del análisis de la relación entre la captación de CO₂ y la cantidad de biohidrógeno generado.
- Estimar la viabilidad del sistema de cultivo de microalgas para el establecimiento de un modelo escalable a nivel industrial, mediante análisis de costo y beneficio.

1.8 Hipótesis o idea a defender

El cultivo de las microalgas *Chlorella sp.*, *Nannochloropsis sp.* y *Dunaliella salina* mediante inyección de CO₂ en condiciones controladas permite una eficiente captación de dióxido de carbono y una producción medible de biohidrógeno, constituyendo una alternativa viable para mitigar emisiones industriales y generar energía limpia.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

El cambio climático se asocia principalmente con la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) derivados de la combustión de combustibles no renovables. Por ello, es necesario adoptar fuentes de energía alternativas para controlar estas emisiones. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los compromisos de cero emisiones netas de las Naciones Unidas también instan a las naciones a adoptar fuentes de energía sostenibles alternativas (Castro, Forster, Gustavo, Mudhoo y Ziero, 2021).

El panorama energético actual se encuentra dominado en gran proporción por los combustibles fósiles, como: gas natural, petróleo y carbón, que incrementan considerablemente el calentamiento global y la contaminación atmosférica debido a sus recursos limitados. Debido a la creciente demanda energética, es importante explorar alternativas sostenibles que satisfagan estas necesidades sin destruir el medio ambiente. La industria de la biomasa, que incluye aguas residuales y materia orgánica, se está convirtiendo en diversos biocombustibles, en particular el biohidrógeno. La producción de biohidrógeno a partir de algas brinda diversas ventajas, como un alto rendimiento de biomasa, un rápido desarrollo y una mínima necesidad de terreno. Además, la integración de la creación de biohidrógeno a partir de algas con otras técnicas de energía renovable, como la captura de carbono y el tratamiento de aguas residuales, resulta prometedora. Sin embargo, es necesario resolver varios desafíos para establecer una producción sostenida de biohidrógeno a partir de algas. Dentro de los desafíos se sitúa que la dificultad para producir hidrógeno a partir de microalgas, se atribuye a su bajo rendimiento; a los costos involucrados en el cultivo y la cosecha de microalgas; y la falta de procesos estandarizados para la generación del mismo (Aravind, Baskaran, Kean, Kishore, Rathi y Sheng, 2024).

Según Al-Tohamy, Elsamahy, Jiao, Kornaros, Manthos, Pispas y Tsigkou (2024), en una indagación que lleva por título Avances recientes en la producción sostenible de hidrógeno a partir de microalgas: mecanismos, desafíos y perspectivas futuras; realizada en China, menciona que a nivel internacional, se ha incrementado la conciencia sobre el potencial del hidrógeno como portador

energético intermedio, tanto para el almacenamiento y transporte de energía renovable como para su uso como combustible en celdas de combustible, las cuales se caracterizan por generar mínimas emisiones contaminantes. Pese a este interés, la comercialización del cultivo de microalgas con fines de producción de biohidrógeno sigue siendo limitada. Esta situación se atribuye principalmente a las restricciones asociadas al consumo energético y a la rentabilidad económica, derivadas de elementos tecnológicos aún en proceso de optimización, especialmente en lo referente a la eficiencia en la generación de biomasa. El biohidrógeno ha sido identificado como un biocombustible prometedor, dada que sirve para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en sectores clave como el energético y el del transporte, así como para reducir la dependencia de fuentes fósiles. Varias investigaciones han enfocado sus esfuerzos en analizar los avances tecnológicos recientes relacionados con cultivos experimentales y etapas posteriores al cultivo, con el objetivo de asegurar una producción sostenible de biohidrógeno a partir de microalgas. Aunque aún se desconoce con claridad el papel que desempeñará el biohidrógeno en una futura economía basada en hidrógeno, se reconoce que su implementación como recurso energético sostenible podría generar impactos económicos relevantes, siempre y cuando se logren superar los desafíos científicos y tecnológicos existentes.

Así también en otro estudio realizado en China, por Alanazi, Ardo, Al-Zahrani, Cheng, Chi-Wei, Hossain y Yi-Ming (2023), se considera la producción de hidrógeno a partir de microalgas, como una alternativa con alto potencial de sostenibilidad y rentabilidad, aunque la parte económica está influenciada por diversos motivos que incluyen los costos de cultivo, cosecha y procesamiento, así como el rendimiento global del proceso de producción de biohidrógeno. Estos costos pueden variar en función de la ubicación, el método de cultivo y la especie de microalga utilizada; por ejemplo, si bien los sistemas de estanques abiertos requieren una inversión inicial menor que los fotobiorreactores cerrados, presentan una eficiencia reducida y mayor vulnerabilidad a la contaminación (Jalalah, Jingyuan, Xiaogang y Zheng, 2022).

Una estrategia para reducir los gastos operativos es el uso de efluentes u otras fuentes de nutrientes de bajo costo, lo que también genera beneficios ambientales. Aun así, las etapas de refinado y cosecha siguen siendo altamente demandantes en términos energéticos y económicos. El diseño del biorreactor y la

configuración del proceso productivo tienen un impacto directo en los costos, estimándose que la construcción de un sistema de 10 centímetros de profundidad y 110.000 metros cuadrados de superficie requiere una inversión considerable para alcanzar una producción diaria de biohidrógeno, a lo que se suman altos gastos de mano de obra debido a la gran extensión del cultivo (Kannan y Sathyaprakasan, 2015). Para alcanzar una producción comercial a gran escala que sea competitiva, es fundamental combinar una evaluación económica con criterios ambientales.

En España, se han realizado propuestas de viabilidad técnica-económica para plantas de producción de microalgas con fines de valoración energética, donde se manifiesta que el cultivo de algas a gran escala presenta algunas ventajas e intereses; estando entre ellos: las elevadas tasas de crecimiento, la superficie o volumen, la gran densidad de crecimiento bajo condiciones semicontroladas en los fotobiorreactores, obtención de productos de gran valor (Valera, 2018).

En indagaciones realizadas en México, se ha evaluado el efecto del dióxido de carbono, en el crecimiento de microalgas en condiciones de fotobiorreactores, teniendo como resultado que el aporte de CO₂, en el medio de cultivo de las cepas de microalgas, producen un incremento en la concentración celular en comparación con tratamientos de control suministrados con aire, considerando así que las microalgas, favorecen la biofijación del dióxido de carbono (Hinojosa, 2012).

En un estudio realizado en Colombia por los autores Castiblanco y Sandoval (2022), titulado "Revisión del potencial de obtención de biohidrógeno a partir de microalgas en Colombia", indicaron que el biohidrógeno se ha consolidado como un vector energético prometedor dentro del mercado de energías sostenibles, debido a su versatilidad de uso y al hecho de que su combustión únicamente genera agua como subproducto. Su obtención puede realizarse a partir de diversos microorganismos, incluyendo microalgas verdes, quienes tienen un alto rendimiento fotosintético y potencial de captar dióxido de carbono.

Cabe mencionar que los factores que favorecen el crecimiento microalgal no necesariamente coinciden con aquellos que mejoran la producción de hidrógeno, por lo que el proceso debe abordarse de manera integral. Para potenciar su eficiencia, se deben considerar tres aspectos fundamentales: la elección de cepas o consorcios microbianos, la tolerancia frente condiciones variables, el diseño correcto del fotobiorreactor, y los mecanismos eficaces para la recolección del hidrógeno generado. A pesar de su potencial, el desarrollo del biohidrógeno a

escala industrial aún enfrenta barreras a nivel técnico y económico. Por el contrario, los avances recientes en ingeniería biotecnológica y en el diseño de biorreactores ofrecen perspectivas alentadoras para su implementación futura a mayor escala. (Castiblanco y Sandoval, 2022).

Complementariamente, en un estudio también realizado en Colombia, de acuerdo a Ararát, Sanclemente y Vergara (2023), en su artículo de investigación “Biofijación de CO₂ por dos especies de microalgas cultivadas en fotobiorreactores”, manifiestan que diferentes indagaciones han comprobado que el suministro de una fuente adicional de CO₂ en cultivos de microalgas tiene un efecto positivo sobre la productividad de biomasa, en comparación con cultivos expuestos únicamente a aire atmosférico. Sin embargo, la posibilidad de asimilación de CO₂ varía entre especies, y concentraciones excesivamente altas pueden generar efectos inhibitorios en el crecimiento celular.

A nivel nacional, en el libro Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético, Alvarez y Mercado, (2022), describen que, en el ámbito del aprovechamiento biotecnológico, se han desarrollado investigaciones focalizadas en el cultivo de cepas microalgales con potencial industrial, en las cuales se han evaluado variables fisicoquímicas como el pH, temperatura, intensidad lumínica, fotoperiodo y disponibilidad de nutrientes. Estos ensayos experimentales han permitido establecer las condiciones propicias de crecimiento para maximizar la productividad de biomasa, mejorar la cinética del cultivo y potenciar los costos operativos en sistemas controlados.

Según un informe realizado en el año 2019 por la Administración de Información Energética (EIA), la producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables es actualmente más cara que la de los métodos convencionales basados en gas natural o carbón. Esta diferencia de coste ha sido uno de los principales aspectos que han afectado la competitividad del hidrógeno renovable, incluyendo nuevos procesos basados en sistemas biológicos como el uso de microalgas. Por el contrario, los métodos de producción tradicionales, establecidos y basados en la infraestructura existente, presentan costes relativamente más bajos, lo que ha servido para su predominio en la matriz energética actual (García, 2021).

2.2 Bases científicas y teóricas de la temática

2.2.1 Microalgas

Se llaman microalgas a una cantidad grande de especies que constituyen al fitoplancton y comprende desde organismos autótrofos hasta microflagelados y microciliados auxótrofos (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1989).

2.2.1.1. Fases de crecimiento de las microalgas.

De acuerdo a los autores Fogg y Thake, (1987), del libro Cultivos de algas y ecología del fitoplancton; describen como es el crecimiento de las poblaciones de microalgas, manifestando que se desarrollan generalmente en un ciclo que comprende entre tres y cinco fases, las cuales están relacionadas con el estado nutricional y fisiológico de las células. La duración de cada etapa puede variar notablemente, siendo más corta, más prolongada o incluso difícil de distinguir, según factores como la temperatura, la intensidad y calidad de la luz, la composición del medio de cultivo, el tamaño del inóculo y la condición fisiológica del alga.

La primera es la fase de inducción o retraso del crecimiento, donde las células comienzan a adaptarse al nuevo medio de cultivo, absorbiendo nutrientes y realizando ajustes bioquímicos necesarios para su futura división. Durante este período no se observa un aumento en el número de células.

La fase exponencial, está caracterizada por un ritmo acelerado y constante de reproducción celular, lo que provoca un crecimiento exponencial de la población. En esta etapa es ideal cosechar las células para utilizarlas como inóculos en otros cultivos, visto que mantienen la mayor tasa de división y ofrecen un rendimiento apto. Posteriormente ocurre la fase de declinación relativa del crecimiento, en la que la población continúa aumentando, pero con una tasa cada vez menor. Esto se debe a causas como la disminución de nutrientes, alteraciones del pH, menor disponibilidad de luz o la acumulación de metabolitos tóxicos que generan autoinhibición. Luego se alcanza la fase estacionaria, donde el número total de células se mantiene prácticamente constante porque la tasa de crecimiento se equilibra con la tasa de mortalidad celular.

Por último, se llega a la fase de muerte, caracterizada por una reducción progresiva de las células. En esta etapa, las condiciones del cultivo se vuelven desfavorables, con un aumento de bacterias, hongos y acumulación de restos celulares que aceleran el colapso del cultivo (Fogg y Thake, 1987).

2.2.1.1.1. Crecimiento y conteo celular de microalgas.

El crecimiento de los cultivos de microalgas es expresado como el incremento del número de células por mililitro. El conteo de células es un método utilizado para identificar y estudiar el crecimiento de una cepa, se utilizan técnicas como el hemocitómetro o también conocido como cámara de Neubauer (Cognita Conecta, 2023).

2.2.1.1.2. Cámara de Neubauer.

Dispositivo de vidrio que posibilita contar las células en un área determinada, proporciona datos precisos sobre el número de células presentes en una muestra (Cognita Conecta, 2023).

2.2.1.2. Chlorella sp.

Es una microalga que pertenece a la familia *Chlorellaceae* y al phylum *Chlorophyta*, son células circulares que cuentan con una pequeña hendidura en el centro y su tamaño varía entre 2 y 10 micras (Ayala, Colina, Martínez y Vera, 2007).

2.2.1.3 Nannochloropsis sp.

Se trata de un alga unicelular perteneciente a la clase *Eustigmatophyceae*, que se encuentra tanto en ambientes marinos como en aguas continentales. Presenta una forma esférica, aunque en ocasiones ligeramente ovoide, con un diámetro celular que varía entre 2 y 5 micrómetros. Sus principales pigmentos son la clorofila a y la violaxantina. La pared celular está formada por dos componentes: uno fibrilar y otro amorfo. El componente fibrilar está constituido principalmente por celulosa, mientras que el amorfo corresponde a una combinación de polisacáridos, proteínas y lípidos (Hibberd, 2023).

2.2.1.4. Dunaliella salina.

Es una microalga perteneciente al grupo de las clorofíceas que presenta un ciclo de vida complejo, caracterizado por la alternancia entre fases de reproducción vegetativa y sexual. Tiene la capacidad de sintetizar y acumular diversos compuestos bioactivos, como clorofila, ácidos grasos poliinsaturados, luteína y zeaxantina, los cuales se distinguen por su alta eficacia como antioxidantes y pueden encontrarse en grandes cantidades (Caetano, Correa, Gorgich, Morais y Mata, 2020).

2.2.1.5. Macro, micronutrientes, metales traza y vitaminas.

Según Barsanti y Gualtieri, (2006) manifiestan que: “los macro y micronutrientes son requeridos por las microalgas en cantidades de miligramos por litro o microgramos por litro en el medio de cultivo. Tienen especial importancia en el adecuado funcionamiento de las células”.

Se requieren muchos metales en bajas concentraciones para el crecimiento de las microalgas. Las recetas más comunes incluyen hierro, molibdeno, zinc, cobalto y manganeso. Se pueden incluir otros metales según la receta. Las soluciones de metales trazan se suelen preparar con EDTA, que fija los metales disueltos para evitar que precipiten, se incorporan también vitaminas en el medio de cultivo que brinda un adecuado crecimiento celular (Industrial Plankton, 2023).

2.2.1.6. Proceso fotosintético en microalgas.

La mayor parte de las microalgas son fotoautótrofas, usan energía solar, CO₂, agua para la producción de compuestos orgánicos a través de la fotosíntesis oxigénica. Estos microorganismos mantienen una productividad fotosintética 10 veces mayor que las plantas terrestres y presentan tasas elevadas de crecimiento y tolerancia a ambientes extremos (Campo y Segura, 2022).

Al ser organismos fotosintéticos, las microalgas están especialmente adaptadas para captar el CO₂ presente en el ambiente. Su cultivo permite remover este gas de efecto invernadero y almacenarlo en forma de biomasa (Zhu, Long y Ort, 2008).

2.2.1.7. Biocombustibles de tercera generación.

Los biocombustibles de tercera generación se originan por la biomasa tanto de microalgas como cianobacterias. Mismas que se pueden usar para dar paso de manera natural a alcoholes y lípidos y transformar en biodiésel o cualquier otro combustible alto en energía. Son cultivos conocidos por su crecimiento rápido y densidad energética que se almacena en sus componentes químicos. También, son denominados como “cultivos energéticos” (Carbon Neutral, 2025).

2.2.1.8. Dióxido de Carbono.

El dióxido de carbono es reconocido en condiciones ambientales como un gas inodoro e incoloro, representado por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno unidos por enlaces covalentes. Es un componente natural del aire y un gas de efecto invernadero; hoy en día, él es considerado el mayor causante del cambio climático, debido a su incontrolado y continuo aumento en la atmósfera (Arroyo y Ramírez, 2020).

2.2.1.9. Captación y fijación de dióxido de carbono mediante microalgas.

La captura de CO₂ mediante microalgas representa una alternativa de gran relevancia, estos microorganismos presentan elevadas tasas de crecimiento y una notable tolerancia a condiciones ambientales extremas. A través de su cultivo a escala industrial, es posible valorizar un gas de efecto invernadero como el CO₂ antes de su liberación a la atmósfera, convirtiéndolo en soluciones útiles y beneficiosas para el ser humano, promoviendo un modelo de economía circular y sostenible (Campo y Segura, 2022).

Las microalgas presentan tasas grandes de crecimiento que aportan a una mayor productividad de biomasa y actividad fotosintética, siendo apreciablemente más eficiente para la fijación del dióxido de carbono (Benedetti, Osto, y Vecchi, 2018).

La concentración de dióxido de carbono en el aire influye directamente en el crecimiento de las microalgas, cuanto más alta sea la concentración mayor será el crecimiento celular (Lefsrud, Loganathan y Orsat, 2018).

2.2.2 Producción de biohidrógeno

2.2.2.1 Biohidrógeno.

El biohidrógeno es un tipo de hidrógeno renovable generado a partir de biogás, biometano o biomasa. A diferencia de otras formas de hidrógeno, puede alcanzar una huella de carbono nula o incluso negativa cuando se produce utilizando residuos orgánicos como materia prima (Genia Bioenergy, sf).

2.2.2.2. Biohidrógeno como vector energético limpio.

El biohidrógeno es una forma de energía renovable y limpia que se perfila como una alternativa alcanzable a los combustibles fósiles. Entre sus principales ventajas están su neutralidad de carbono, llegando incluso a generar cero emisiones, su carácter renovable, la posibilidad de producirlo mediante procesos biológicos ecoeficientes, su transformación en energía de manera respetuosa con el ambiente y su alto poder energético, superior al de otros combustibles convencionales (Arumugam, Jeoly, Rupesh, Sivaranjani, Sowmiya y Sudalai, 2023).

2.2.2.3. Factores que intervienen en la producción de biohidrógeno.

2.2.2.3.1 pH.

El pH en el medio de cultivo constituye un parámetro determinante para el desarrollo y la actividad metabólica de las microalgas, lo que a su vez influye directamente en la generación de biohidrógeno (Ngho, Parab, Sathinathan, Yusoff y Vello, 2023). Mantener el pH estable dentro del rango adecuado es importante para optimar la producción, la cual suele ser más eficiente en valores comprendidos entre 4,5 y 8,0. Aunque cada cepa presenta un rango específico, la mayoría alcanza su máximo rendimiento entre 6,5 y 8,5, lo que resalta la relevancia de un control preciso del pH en cultivos destinados a la obtención de biohidrógeno (Al-Tohamy et al. 2024).

2.2.2.3.2. Luz.

La luz es un factor fundamental y, al mismo tiempo, restrictivo para el desarrollo de las microalgas, una baja disponibilidad reduce el crecimiento celular, mientras que una intensidad excesiva puede generar fotoinhibición y dañar el complejo antena de los fotosistemas. Por ello, se debe de ajustar tanto la intensidad de irradiación (cantidad de flujo luminoso por unidad de área) como el fotoperiodo (número de horas de exposición a la luz) según las necesidades de la especie cultivada. Entre los regímenes más utilizados se encuentran 12:12, 18:6 y 14:10 horas de luz y oscuridad, seleccionados en función de los requerimientos específicos para tener un crecimiento adecuado y ampliar la producción de biomasa (Giraldo, 2013).

2.2.2.3.3. Temperatura.

La temperatura constituye influye directamente en sus procesos metabólicos y en la estabilidad de las estructuras celulares. Diversos estudios señalan que el intervalo apropiado para el crecimiento de la mayoría de cepas se encuentra entre 20 y 30 °C, una temperatura que exceda dichos límites, podría matar o dañar las células (Chisti, 2008).

2.2.2.3.4. Sistemas de cultivos de microalgas.

Según Borowitzka, (1999) en su investigación titulada Producción comercial de microalgas: estanques, tanques, tubos y fermentadores, menciona que, “los sistemas de cultivo que se utilizan para cultivar algas son generalmente bastante sencillos”.

Los sistemas de cosecha de microalgas tienen que ser diseñados para brindar las condiciones adecuadas que necesiten las cepas seleccionadas con una demanda y un costo menor de energía. Por ende, se deben dotar las condiciones de cultivo apropiadas. Para cumplir con estos criterios, los sistemas debe estar diseñado de forma que garantice mezclado y transferencia de masa eficiente. Los biorreactores se clasifican de acuerdo al diseño: sistemas abiertos (estanques extensos sin mezclar, estanques con canales) y sistemas cerrados (fotobiorreactores tubulares, verticales, fermentadores heterótrofos) (Chang 2017).

2.2.2.4. Fotobiorreactores.

Los fotobiorreactores se utilizan especialmente para la fermentación expuesta a la luz solar o a la iluminación artificial. Se puede utilizar vidrio o, más típicamente, plástico transparente para su construcción. Es necesario mantener una penetración adecuada de la luz solar. Suelen operar continuamente a una temperatura de entre 20 a 28 °C. Los fotobiorreactores son una herramienta potencial para la conversión de CO₂ y la síntesis de biocombustibles. Se introduce en el biorreactor para proporcionar aireación (Kim, Kumar, Ranganathan, Sirohi y Tuan, 2022).

El fotobiorreactor (FBR) es el equipo más crítico para la fijación fotosintética de CO₂ por parte de las microalgas. Proporciona condiciones ambientales adecuadas, como CO₂, luz y nutrientes, para el crecimiento de las microalgas. (Fu, Huang, Yun, Xia y Zhu, 2019).

2.2.2.5. Recolección de biohidrógeno.

La recolección de hidrógeno en sistemas de cultivo de microalgas se basa en el uso de reactores cerrados que permiten capturar los gases generados durante el metabolismo celular y conducirlos hacia un sistema externo de retención o medición.

2.2.2.6. Medidor de hidrógeno en agua.

Dispositivo diseñado para medir la concentración de hidrógeno disuelto en el agua. El rango de medición varía según el modelo, pero generalmente mide desde 0 hasta 2.5 ppm (partes por millón) (VVA Industrial, sf).

2.2.3 Viabilidad y escalabilidad de sistemas algales en las industrias

La producción y aprovechamiento de microalgas a gran escala se ha consolidado como una alternativa sostenible con potencial para impactar diversos sectores productivos. Su interdisciplinariedad permite generar biomasa con múltiples aplicaciones, desde biocombustibles y biohidrógeno hasta compuestos de valor agregado para diversas industrias (Ashraf, Chang, Chew, Leong, Loke y Peter, 2021).

Para realizar esto se suma la integración de tecnologías avanzadas propias de la Industria 5.0; que, de acuerdo al Instituto de la Economía Digital de la Escuela Superior de Investigación Comercial, (2022): “se refiere a la transformación de las industrias, pasando de un modelo centrado en la producción hacia uno basado en la generación de valor, donde no solo se priorizan los beneficios económicos, sino también los impactos sociales y ambientales, con un enfoque más sostenible y responsable en la obtención de beneficios.”.

Dicha industria representa un paso, para el aprovechamiento de los sistemas de cultivo algal, impulsa la efectividad de los procesos, mejora la calidad del producto y fomenta la reducción de emisiones de carbono, llegando incluso a plantear escenarios de cero emisiones en la producción industrial. Además, a nivel económico, la aplicación de modelos avanzados de fotobiorreactores (FBR) y prácticas innovadoras de cultivo transforma la cadena de valor, personaliza la producción de bioenergía y dinamiza el mercado, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Todo esto refuerza la escalabilidad de los sistemas algales, demostrando que su implementación industrial no solo es técnicamente posible, sino también ambientalmente beneficiosa y socialmente estratégica para la transición energética (Ashraf et al. 2021).

2.2.3.1. Sector industrial

Montevirgen, (2024) menciona que “el sector industrial engloba a todas aquellas empresas que producen bienes de capital (productos utilizados para fabricar otros productos) y servicios orientados a brindar apoyo de manera directa a empresas y fabricantes en lugar de centrarse en los consumidores”.

2.2.3.2. Análisis de sostenibilidad

En el estudio realizado por Aravind et al. (2024), titulado “Consideraciones de sostenibilidad en el biohidrógeno a partir de bioalgas mediante su cultivo y cosecha: Revisión crítica”, afirman que: El potencial de la producción de biohidrógeno a partir de algas como fuente de energía sostenible es prometedor. La adaptabilidad de las algas a diversos entornos, como lagos abiertos, fotobiorreactores cerrados y plantas de tratamiento de aguas residuales, las convierte en una opción versátil para la producción a gran escala. También, el

cultivo de algas para la producción de biohidrógeno ofrece ventajas ambientales, como el tratamiento de aguas residuales y el secuestro de dióxido de carbono. Sin embargo, antes de su comercialización generalizada, es necesario abordar varios desafíos, como mejorar la eficiencia de la producción de hidrógeno, desarrollar sistemas de crecimiento rentables y garantizar la escalabilidad de la producción. A pesar de estos desafíos, los resultados de investigaciones optimistas y los avances tecnológicos en curso sugieren que el biohidrógeno proveniente de algas podría ser un elemento fundamental en el panorama energético futuro (Aravind et al. 2024).

2.2.4 Modelos estadísticos

La estadística se encarga de reunir, organizar, analizar, interpretar y presentar datos de manera sistemática. Un modelo estadístico consiste en un conjunto de expresiones matemáticas que representan el comportamiento de elementos dentro de una categoría específica, utilizando variables aleatorias y sus distribuciones de probabilidad correspondientes. Estos modelos se emplean para describir y predecir patrones en distintos tipos de datos (Han, Kamber y Pei, 2012).

2.3 Marco Legal

2.3.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)

Título II
Capítulo segundo
Derechos del buen vivir
Sección primera
Agua y alimentación

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*.

Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.

Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua.

Se prohíbe el desarrollo, producción, tenencia, comercialización, importación, transporte, almacenamiento y uso de armas químicas, biológicas y nucleares, de contaminantes orgánicos persistentes altamente tóxicos, agroquímicos internacionalmente prohibidos, y las tecnologías y agentes biológicos experimentales nocivos y organismos genéticamente modificados perjudiciales para la salud humana o que atenten contra la soberanía alimentaria o los ecosistemas, así como la introducción de residuos nucleares y desechos tóxicos al territorio nacional.

TÍTULO VII

RÉGIMEN DEL BUEN VIVIR

Capítulo segundo

Sección séptima

Biosfera, ecología urbana y energías alternativas

Art. 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.

Art. 414.- El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo.

2.3.2 Código Orgánico del Ambiente (2017)

LIBRO TERCERO

DE LA CALIDAD AMBIENTAL

TÍTULO VI

PRODUCCION Y CONSUMO SUSTENTABLE

Art. 245.- Obligaciones generales para la producción más limpia y el consumo sustentable. Todas las instituciones del Estado y las personas naturales o jurídicas, están obligadas según corresponda, a:

1. Incorporar en sus propias estructuras y planes, programas, proyectos y actividades, la normativa y principios generales relacionados con la prevención de la contaminación, establecidas en este Código;
2. Optimizar el aprovechamiento sustentable de materias primas;
3. Fomentar y propender la optimización y eficiencia energética, así como el aprovechamiento de energías renovables;
4. Prevenir y minimizar la generación de cargas contaminantes al ambiente, considerando el ciclo de vida del producto;

5. Fomentar procesos de mejoramiento continuo que disminuyan emisiones;
6. Promover con las entidades competentes el acceso a la educación para el consumo sustentable;
7. Promover el acceso a la información sobre productos y servicios en base a criterios sociales, ambientales y económicos para la producción más limpia y consumo sustentable;
8. Coordinar mecanismos que faciliten la transferencia de tecnología para la producción más limpia;
9. Minimizar y aprovechar los desechos; y,
10. Otros que la Autoridad Ambiental Nacional dicte para el efecto.

2.3.3 Ley Orgánica de Eficiencia Energética (2019)

CAPÍTULO III DE LOS SECTORES REGULADOS

Artículo 16.- De los consumidores de energía.- Los consumidores en los sectores público, industrial, comercial, turístico y recreativo, deberán procurar la implementación de acciones de eficiencia energética, mediante la adquisición de nuevas tecnologías, políticas de concientización empresarial, y optimización de uso de la energía en sus procesos productivos, con lo cual podrán ser beneficiarios de los incentivos que se establezcan para el efecto, así como del otorgamiento de certificados de ahorro de energía, de conformidad con los parámetros y condiciones establecidos en el Reglamento a esta Ley. El Reglamento a esta Ley podrá contemplar obligaciones en materia de eficiencia energética, para los grandes consumidores de energía.

Artículo 17.- Ahorro y uso eficiente de energía. - A nivel nacional, todo consumidor de energía debe velar permanentemente porque sus consumos estén enmarcados en el uso racional de la energía, y adaptar sus comportamientos de consumo, orientándolos al ahorro energético, sin que esto signifique disminuir sus condiciones de confort y producción.

El CNEE elaborará y actualizará permanentemente un listado de equipos de alto consumo energético que deberán ser reglamentados, en cuanto a su desempeño de eficiencia, por el organismo nacional de normalización.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque de la investigación

El presente estudio adoptó un enfoque cuantitativo, sustentado en la recolección y análisis de datos numéricos derivados de experimentos en condiciones controladas de laboratorio. Se aplicó estadística descriptiva mediante el uso de promedios, desviación estándar; se emplearon también tablas, para la visualización y organización acorde de los resultados obtenidos respecto a variables como la producción de biohidrógeno, y la eficiencia en la captación de CO₂. Esta aproximación permitió identificar tendencias y patrones de comportamiento entre los distintos tratamientos y condiciones aplicadas. Se contempló el uso de estadística inferencial, la prueba t de Student pareada, ANOVA, con el propósito de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas.

3.1.1 Tipo y alcance de la investigación

La elaboración del presente trabajo, tuvo un enfoque de tipo experimental, se basó en la relación causa y efecto a través la evaluación en laboratorio de diversas variables, en este caso para el conocimiento de la viabilidad de la producción de biohidrógeno mediante la captación de dióxido de carbono utilizando microalgas previamente seleccionadas y el respectivo análisis de sus características.

En cuanto al alcance, la investigación fue de tipo explicativa, donde se buscó identificar y comprender los mecanismos que intervinieron en la producción de biohidrógeno a partir de la captación de dióxido de carbono por microalgas. Este nivel de investigación permitió no solo describir las variables involucradas, sino también explicar las relaciones causales entre ellas, particularmente cómo las condiciones experimentales influyeron en la eficiencia del proceso. De igual manera, se presentaron componentes bibliográficos y descriptivos, al caracterizar las microalgas utilizadas y documentar los parámetros que afectaron a la producción de biohidrógeno bajo condiciones controladas.

3.1.2 Diseño de investigación

El proyecto tomó un diseño experimental debido a que se establecieron relaciones causales claras entre variables controladas en condiciones de laboratorio. Esquivel, (2025), sugiere que: “el diseño experimental es un método de carácter estadístico que consiste en modificar deliberadamente la variable independiente con el fin de analizar y cuantificar su influencia sobre la variable dependiente.”.

3.3 Metodología

3.2.1 Variables

3.2.1.1. Variable independiente.

- Tipo de microalgas utilizadas (*Nannochloropsis sp.*, *Chlorella sp.*, *Dunaliella salina*),
- Tiempo de cultivo,
- Dosificación de dióxido de carbono en el medio de cultivo,

3.2.1.2. Variable dependiente.

- Eficiencia en la captura de dióxido de carbono,
- Producción de biohidrógeno.

3.2.1.3. Condiciones controladas.

- Temperatura,
- Iluminación,
- pH.

3.2.2 Matriz de operacionalización de variables

Se detalla la operacionalización de las variables utilizadas en el estudio, especificando su tipo, nivel de medida en el que serán evaluadas y sus características, se encuentran contempladas en Anexo 8 y Anexo 9.

3.2.3 Tratamientos

Para los tratamientos experimentales se empleó una concentración de 3% de CO₂, como se observa en la Tabla 1; refleja condiciones comunes en emisiones industriales, dentro del rango favorable para microalgas. Esta dosis permitió un balance adecuado entre disponibilidad de carbono, estabilidad del medio de cultivo y eficiencia en la captura de gases.

Tabla 1.

Tratamientos Experimentales

Tratamientos	Tipo microalga	Réplicas	Concentración de CO₂
Control blanco	-	-	-
Control blanco	-	-	3%
Control	<i>Nannochloropsis sp.</i>	-	-
Control	<i>Dunaliella salina</i>	-	-
Control	<i>Chlorella sp.</i>	-	-
T1	<i>Nannochloropsis sp.</i>	5	3%
T2	<i>Dunaliella salina</i>	5	3%
T3	<i>Chlorella sp.</i>	5	3%

Notas: Los controles pertenecen a cultivos de cada especie sin adición de CO₂.

Elaborado por: La Autora, 2026

3.2.4 Diseño experimental

El experimento se desarrolló bajo un diseño completamente al azar, considerando 3 tratamientos correspondientes a las cepas de microalgas y 5 repeticiones por cada uno; para lo cual se construyó un sistema de cultivo con fotobiorreactores, utilizando botellas de vidrio esterilizadas, donde se inocularon cepas puras de *Nannochloropsis sp.*, *Chlorella sp.* y *Dunaliella salina*, previamente distribuidas en un medio de cultivo, preparado con agua de mar anteriormente filtrada, autoclavada y pasada por luz ultravioleta, y se añadieron cantidades específicas de cada solución fertilizante en este caso 1mL por cada litro de agua. De modo que se obtuvieron 3 fotobiorreactores, 1 por cada cepa de microalga, mismos que fueron conectados a aireación constante, bajo fotoperíodo de

iluminación 12:12 (luz: oscuridad); con pH y temperatura controlados. Se ejecutó el proceso de masificación de cada una de las cepas por aproximadamente 45 días en donde se realizaron suministros del medio de cultivo y respectivas resiembras en nuevos fotobiorreactores, obteniendo así un total de 3 FBR como controles (uno por cada cepa) y 5 réplicas o repeticiones por cada tratamiento, manteniendo para todos los cultivos las adecuadas condiciones de laboratorio.

Antes de la dosificación del dióxido de carbono se realizó un conteo celular utilizando cámara de Neubauer y microscopio, esto para los controles y réplicas y conocer así el número de células de cada medio (y compararlo con el resultado después de la inyección de CO₂)

Se inyectaron concentraciones de CO₂, siendo la misma dosificación para los tres tratamientos y sus respectivas replicas, simulando emisiones industriales mediante un cilindro presurizado de CO₂ conectado a través de válvulas y reguladores a cada fotobiorreactor, con la intención de evaluar su impacto sobre la tasa de fijación por parte de las microalgas.

La dosificación de dióxido de carbono, fue suministrada por 12 horas para cada cepa de los fotobiorreactores, siendo el biohidrógeno generado, capturado por un sistema de recolección que consistió en conectar mangueras al FBR, que dirija el hidrogeno generado hacia otra botella con agua destilada donde fue medido con un sensor de hidrógeno previamente calibrado.

Se correlacionaron los datos de captación de CO₂ y generación de biohidrógeno para analizar la eficiencia del proceso, complementado con un análisis económico, donde se presenta la evaluación de la viabilidad y escalabilidad del sistema como fuente de energía renovable en aplicaciones industriales.

3.2.5 Recolección de datos

3.2.5.1. Recursos.

- Recursos biológicos
 - Cepas de microalgas (30 mL de cada una),
- Recursos químicos
 - Tanque de CO₂ (10 Kg),
 - Agua esterilizada,
 - Soluciones fertilizantes para el medio de cultivo (nutrientes),

- Recursos materiales o equipos de laboratorio
 - Pipeta,
 - Autoclave,
 - Microscopio,
 - Cámara de Neubauer,
 - Cabina de flujo laminar,
 - Fotobiorreactores,
 - Aireadores o bombas de aire,
 - Mangueras,
 - Fuente de luz artificial,
 - pH-metro,
 - Vasos de precipitación,
 - Fiolas,
 - Sensor de hidrógeno
- Recursos bibliográficos
 - Artículos científicos,
 - Sitios Web.

3.2.5.2. Métodos y técnicas.

Para el desarrollo de los objetivos planteados en la investigación se emplearon los siguientes métodos y técnicas.

Mediante el diagrama de flujo, se presentan los métodos y técnicas que sustentan el desarrollo del trabajo, iniciando con la selección y adquisición de microalgas, donde se garantizó que las cepas utilizadas sean representativas y adecuadas para el objetivo experimental. Posteriormente, se planteó la preparación del medio de cultivo e inoculación en fotobiorreactores, lo cual aseguró condiciones estériles y un ambiente controlado para el crecimiento de las microalgas.

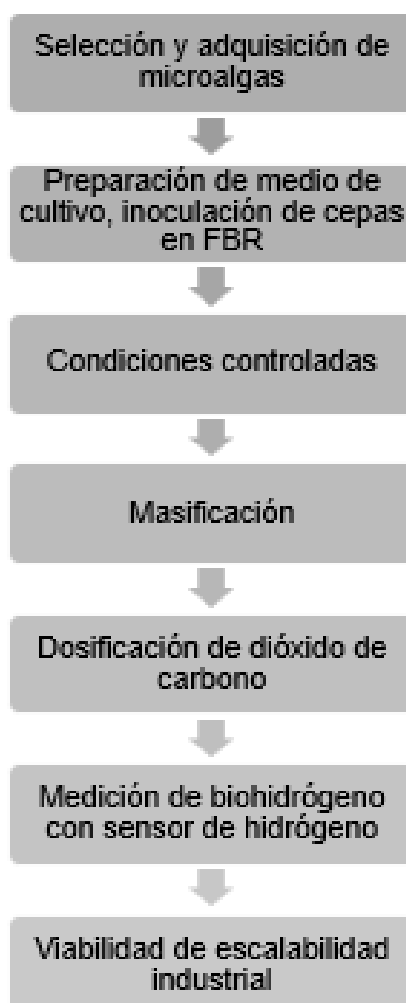
Una vez establecidas las condiciones controladas (pH, temperatura, luz), se definieron los controles, tratamientos y réplicas con adiciones de CO₂, para evaluar la influencia de este gas en la captación y posterior generación biohidrógeno. Consecuente se contempló la recolección del gas generado mediante un sistema de recolección donde el hidrógeno generado fue conducido a botellas con agua destilada para efectuar la medición del mismo, mediante el uso de un sensor y el

análisis de producción de biohidrógeno, que corresponde a la parte analítica y cuantitativa del estudio.

Por último, se abordó la viabilidad de escalabilidad industrial en donde se empleó la relación costo beneficio, con lo cual se enlaza la investigación de laboratorio con aplicaciones reales. Se integró la aplicación de ANOVA, prueba de t de Student, para la interpretación de resultados, cerrando el ciclo metodológico mediante el análisis estadístico y la validación de las hipótesis planteadas.

Figura 2

Diagrama de flujo: Métodos y Técnicas



Elaborado por: La Autora, 2026

3.2.5.3. Métodos.

3.2.5.3.1. Método descriptivo

En esta investigación se empleó el método descriptivo con el propósito de detallar las condiciones, procesos y resultados relacionados con la producción de biohidrógeno a partir de microalgas mediante la captación de dióxido de carbono. Esto permitió observar y registrar de forma ordenada las características de las especies seleccionadas, como *Chlorella sp.*, *Nannochloropsis sp.* y *Dunaliella salina*. Se caracterizó cada etapa del proceso, identificación de los componentes del rendimiento y determinación de patrones que contribuyeron a evaluar la viabilidad del uso de microalgas como materia prima sostenible para la producción de un biocombustible limpio y renovable.

3.2.5.4. Técnicas.

3.2.5.4.1. Determinación de las tasas de captación de CO₂ del cultivo, con la adición de concentraciones de CO₂

Con el objetivo de determinar la tasa de captación de dióxido de carbono por parte de distintas cepas de microalgas, se trabajó con las cepas *Chlorella sp.*, *Nannochloropsis sp.* y *Dunaliella salina*. Mismas que fueron seleccionadas previo a revisiones bibliográficas debido a sus características. Las microalgas fueron obtenidas del Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas (CENAIM).

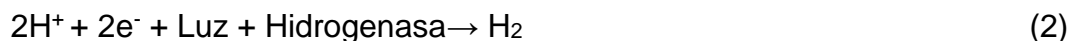
La captación de CO₂ por las microalgas ocurre mediante el proceso de fotosíntesis, cuya reacción general se representa con la siguiente ecuación:



La administración de CO₂ a cultivos de microalgas estimula la actividad fotosintética y la fijación de carbono, aumentando el flujo de electrones producidos en las fotorreacciones. Bajo ciertas condiciones de cultivo, este exceso de poder reductor se canaliza hacia la producción de hidrógeno molecular (H₂), que sirve como vía metabólica para mantener el equilibrio redox celular.

La producción de biohidrógeno en las microalgas se relaciona con la actividad fotosintética, donde el dióxido de carbono y el agua son transformados mediante la energía lumínica en biomasa, oxígeno y electrones. Posteriormente,

bajo la acción de la enzima hidrogenasa, los protones (2H^+) y electrones (2e^-) generados durante el proceso fotosintético son convertidos en hidrógeno molecular.



3.2.5.4.1.1. Preparación del medio de cultivo y condiciones de crecimiento.

El medio de cultivo se preparó utilizando agua de mar esterilizada en autoclave y pasada por filtro UV; se le añadieron también soluciones nutritivas suministradas por el CENAIM, las cuales aportaron con macro, micronutrientes esenciales, metales traza y vitaminas para el desarrollo algal, mismas que se contemplan en la Tabla 2.

Una vez preparado, el medio de cultivo fue distribuido en 3 FBR de vidrio, obteniéndose 1 unidad por cada cepa (*Chlorella sp.*, *Nannochloropsis sp.* y *Dunaliella salina*), siendo resembradas y obteniendo 5 réplicas por cada. Los fotobiorreactores contaron con sistemas de aireación individual mediante bombas conectadas a difusores, manteniendo condiciones apropiadas y controladas durante todo el proceso.

Tabla 2.

Soluciones para medio de cultivo microalgal

Solución	Composición
Solución 1	Nitrato de sodio (NaNO_3) Fosfato de sodio ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
Solución 2	Metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)
Solución 3	EDTA ($\text{Na}_2\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) Cloruro Férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Metales Traza
Solución 4	Vitaminas

Elaborado por: La Autora, 2026

3.2.5.4.1.2. Aplicación de CO_2 y configuración experimental

La aplicación de CO_2 y la configuración experimental se desarrollaron considerando que la concentración fue aplicada a las tres cepas seleccionadas

(*Chlorella sp.*, *Nannochloropsis sp.* y *Dunaliella salina*), estableciendo también dos controles blancos (agua destilada), uno con aireación y otro con dosificación de dióxido de carbono, así también un control sin adición de CO₂ de cada cepa y un tratamiento con inyección de CO₂ para cada una, con cinco réplicas por tratamiento e inyección de CO₂, para evaluar la respuesta de las microalgas frente a las condiciones de captación de dióxido de carbono y su incidencia en la producción de biohidrógeno. El suministro de CO₂ se realizó mediante un cilindro presurizado de 10 kg, conectado a un manómetro y válvulas de aguja de precisión.

Para el desarrollo adecuado de los cultivos, fue necesario mantener un rango de temperatura entre 20 a 28°C, considerado acorde para el crecimiento de las microalgas. El pH ideal fue situado entre 6,5 y 7,5, en vista de que valores inferiores a 4,0 pudiesen haber generado ambientes demasiado ácidos.

3.2.5.4.2. Identificación de la eficiencia de la producción de biohidrógeno de los cultivos de microalgas

3.2.5.4.2.1. Medición de biohidrógeno generado por microalgas a partir de dosificación de dióxido de carbono

La eficiencia de la producción de biohidrógeno en el cultivo de microalgas se determinó a partir del análisis cuantitativo del hidrógeno producido durante la fotosíntesis bajo una dosis controlada de dióxido de carbono. Para ello se implementó un sistema de recolección del gas producido, que permitió evaluar el alcance del cultivo de microalgas para generar biohidrógeno. La medición del biohidrógeno producido se realizó mediante un sistema cerrado acoplado al fotobiorreactor. El reactor contó con una tapa hermética con dos orificios: uno para la inyección de dióxido de carbono al medio de cultivo de microalgas y otro para la conducción de los gases generados durante el proceso fotosintético.

El gas producido se enviaba a través de una manguera a un recipiente secundario que contenía agua destilada, en el que se disolvía parcialmente el hidrógeno. Posteriormente, se determinó la concentración del hidrógeno disuelto utilizando un medidor de hidrógeno portátil.

Anticipadamente a las mediciones experimentales, el equipo de medición del hidrógeno fue calibrado según las especificaciones del fabricante, utilizando soluciones estándar y condiciones controladas.

3.2.5.4.3. Estimación de la viabilidad del sistema de cultivo de microalgas para su escalabilidad industrial.

3.2.5.4.3.1. Análisis relación costo-beneficio.

El objetivo principal para realizar este análisis fue estimar la rentabilidad y la viabilidad económica de la producción de biohidrógeno a partir de microalgas, lo que permitió proyectar su posible escalabilidad a nivel industrial.

Para la estimación de la viabilidad del sistema de cultivo de microalgas y su escalabilidad industrial mediante el análisis costo-beneficio, se aplicó la identificación y valoración monetaria de los costos de inversión, operación y mantenimiento; la proyección de beneficios ambientales y energéticos derivados de la captación de CO₂ y la producción de biohidrógeno.

Para realizar esta relación se emplearon los siguientes valores:

- Valor actual de ingresos totales netos (VAN) o Beneficios netos,
- Valor actual de los costos de inversión (VAC) o Costos totales,
- Valor de costo-beneficio (Pablo, 2024).

Donde el valor costo-beneficio es obtenido de la división entre VAN y VAC.

- Siendo el resultado mayor 1 rentable,
- Menor a 1 no rentable (Pablo, 2024).

3.3.1 Análisis estadístico

3.3.1.1. Estadística descriptiva.

La estadística descriptiva se aplicó al análisis de las muestras obtenidas durante el cultivo de microalgas, permitiendo organizar y resumir los datos experimentales en tablas y gráficas que muestran el comportamiento de variables como la captación de CO₂ y la producción de biohidrógeno.

3.3.1.2. Estadística Inferencial

3.3.1.2.1. *t* de Student pareada.

La estadística inferencial permitió analizar si existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados en el sistema de cultivo de microalgas mediante el uso de la prueba *t* de Student, que sirve para la comparar las medias de dos grupos

y determinar si hay una diferencia significativa entre ellos, para ello se utilizó un nivel de significancia de $p < 0,05$, lo que implica que, si el valor p obtenido es menor o igual a $0,05$, se rechazará la hipótesis nula, concluyendo que las diferencias encontradas son estadísticamente significativas. En cambio, si $p > 0,05$, no se rechaza H_0 a y b, determinando que no hay diferencias significativas en el experimento.

Para la realización del análisis se empleará el programa de InfoStat.

Las hipótesis a emplear en el análisis T de Student pareada, se dividen en la captación de CO_2 y la producción de biohidrógeno.

Captación de CO_2 :

- H_{0a} : No existen diferencias significativas en la captación de CO_2 de las cepas, antes y después de la dosificación de CO_2 .
- H_{1a} : Sí hay diferencias significativas en la captación de CO_2 de las cepas, antes y después de la dosificación de CO_2 .

Producción de Biohidrógeno:

- H_{0b} : No existen diferencias significativas en la producción de biohidrógeno de las cepas, antes y después de la dosificación de CO_2 .
- H_{1b} : Sí hay diferencias significativas en la producción de biohidrógeno de las cepas, antes y después de la dosificación de CO_2 .

3.3.1.2.2. ANOVA.

ANOVA o Análisis de Varianza, es un método estadístico que fue utilizado para la comparación de las medias de los grupos estudiados y determinar si al menos uno de ellos difiere significativamente de los demás (Appinio, 2024). Se realizó el análisis bajo el mismo criterio de la prueba de t de Student, en donde se estableció que, si el resultado del p -value es igual o menor a $0,05$, se concluye que sí existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. En la Tabla 3, se presenta el esquema del análisis de varianza.

Tabla 3.**Esquema de ANOVA**

Fuente de variación	Grados de libertad
Tratamientos (T-1)	$3-1 = 2$
Error experimental T(r-1)	$3(5-1) = 12$
Total (N-1)	$15-1 = 14$

Elaborado por: La Autora, 2026

Donde:

- T: Número de tratamientos microalgales (3 cepas),
- r: Número de repeticiones (5),
- N: Total de observaciones (15).

3.3.1.2.3. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks.

Para el test de Shapiro-Wilks, se planteó la hipótesis nula donde se refleja que una muestra se origina de una distribución normal y una hipótesis alternativa que mantiene que la distribución no es normal. Tomando el mismo nivel de significancia (0,05) de las pruebas, siguiendo el mismo criterio, se rechaza la nula.

- H_0 : La distribución es normal.
- H_1 : La distribución no es normal.

3.3.1.2.4. Análisis de la homogeneidad de varianza.

Se empleó un supuesto, conocido como supuesto de homocedasticidad, que considera que la varianza es constante, es decir que no varía en los diversos niveles de un factor, entre diferentes grupos (Amat, s.f.).

Con esto se planteó lo siguiente:

- H_0 : Las varianzas son homogéneas.
- H_1 : Las varianzas no son homogéneas.

Tomando 0,05 como nivel de significancia, siguiendo el criterio que, de ser menor al nivel, se rechaza la nula, y mayor se procede a aceptar la misma.

3.3.1.2.5. Método de Tukey.

El método de Tukey se utilizó luego del ANOVA desarrollado con el objetivo de realizar múltiples comparaciones de medias sin el riesgo de cometer un error tipo I (es decir, rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera) (Gavara, 2024).

4. RESULTADOS

4.1 Determinación de las tasas de captación de CO₂ del cultivo, con la adición de concentraciones de CO₂, por medio de análisis de laboratorio

La determinación de las tasas de captación de dióxido de carbono se realizó a partir del crecimiento celular de los cultivos microalgales sometidos a dos condiciones experimentales: aireación y dosificación de dióxido de carbono.

El crecimiento celular fue utilizado como indicador de la fijación de CO₂.

Los resultados fueron expresados como número de células por mililitro (cel/mL) y porcentaje de crecimiento celular, lo que permitió evaluar la respuesta de cada cepa.

4.1.1 Captación de CO₂ en *Nannochloropsis sp.*

Los resultados conseguidos para *Nannochloropsis sp.*, expuestos en la Tabla 4, mostraron un crecimiento celular tanto para el control como en las réplicas con suministro de CO₂, como se presenta en la Figura 3.

Así mismo el control, solo fue sometido a aireación, donde el número de células aumentó de 1,50E+05 a 1,58E+05 cel/mL, lo que representa un crecimiento celular del 5%, revelando un crecimiento limitado bajo condición de únicamente aireación, como se observa en la Figura 4.

Los tratamientos con dosificación de CO₂ presentaron incrementos celulares más elevados en todas las réplicas analizadas. Las densidades finales oscilaron entre 9,90E+04 y 2,16E+05 cel/mL, con porcentajes de crecimiento celular comprendidos entre el 26% y el 32%. Señalando una respuesta oportuna del cultivo frente a la adición de dióxido de carbono, observándose valores de crecimiento claramente superiores a los del tratamiento control.

La variabilidad entre las réplicas fue moderada, como lo indican los valores de desviación estándar para el número de células por mililitro. Los porcentajes de crecimiento celular se mantuvieron dentro de un rango moderado, lo que evidencia un comportamiento homogéneo del cultivo en las diferentes réplicas evaluadas, como se presenta en la Figura 5.

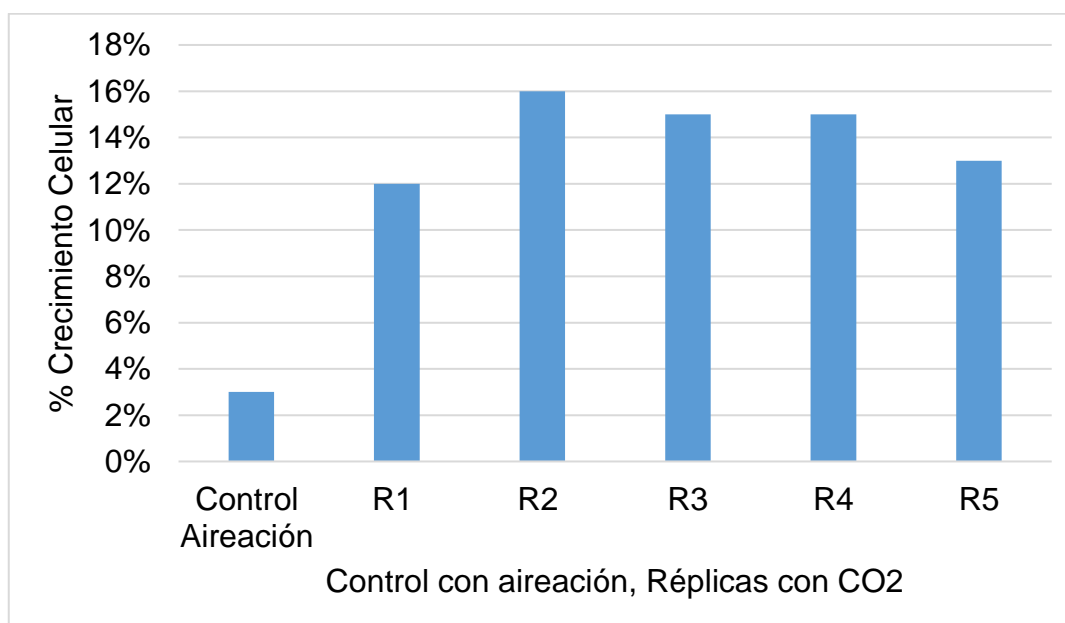
Tabla 4.

Captación de dióxido de carbono: *Nannochloropsis* sp.

Captación de dióxido de carbono: <i>Nannochloropsis</i> sp.			
No. cel/mL			
Tratamiento	Aireación	Aireación	%Crecimiento celular
Control	1,50E+05	1,58E+05	5%
Réplicas	Aireación	CO₂	%Crecimiento celular
R1	7,50E+04	9,90E+04	32%
R2	1,68E+05	2,16E+05	29%
R3	1,13E+05	1,49E+05	32%
R4	1,00E+05	1,26E+05	26%
R5	8,00E+04	1,04E+05	30%
Desviación Estándar	3,71E+04	4,75E+04	2,49%
Promedio de Crecimiento Celular			30%

Elaborado por: La Autora, 2026

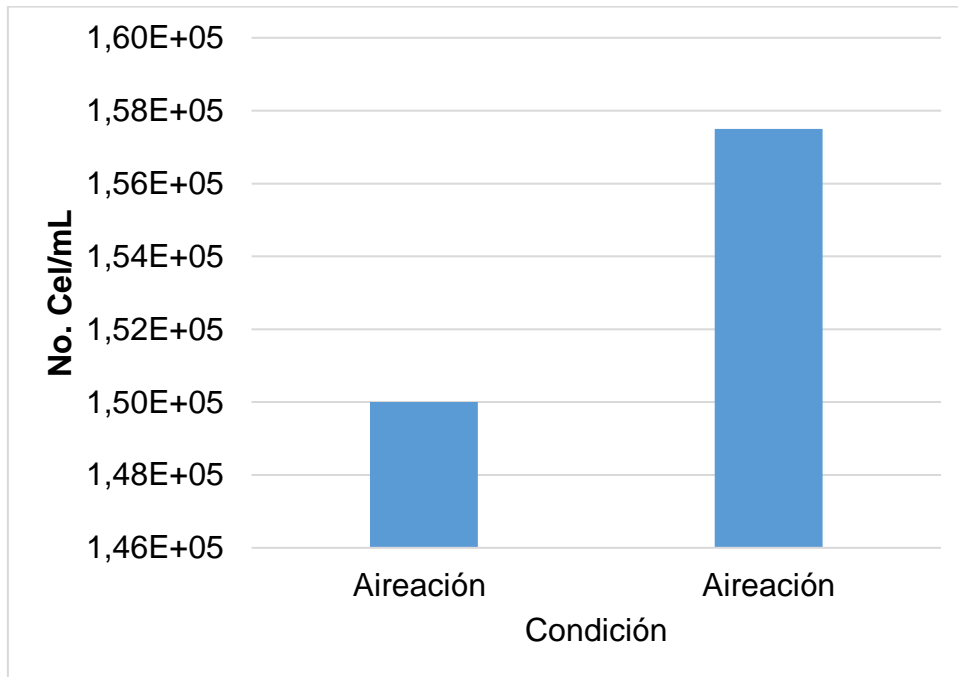
Figura 3

Efecto del CO₂ en el crecimiento celular microalgal en comparación con control con aireación

Elaborado por: La Autora, 2026

Figura 4

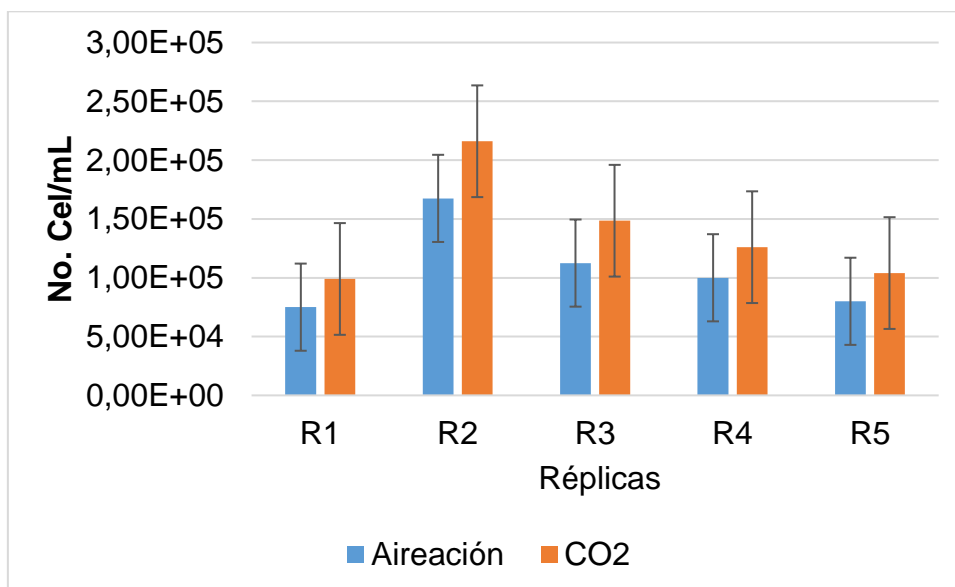
Crecimiento celular de control de *Nannochloropsis sp.*, bajo aireación



Elaborado por: La Autora, 2026

Figura 5

Crecimiento celular de *Nannochloropsis sp.*, (Aireación vs. Dosificación de CO₂)



Elaborado por: La Autora, 2026

4.1.2 Captación de CO₂ en *Dunaliella salina*

Los resultados alcanzados para esta cepa, presentados en la Tabla 5, mantuvieron un incremento en la densidad celular tanto en el control como en las réplicas con dosificación de dióxido de carbono, como se presenta en la Figura 6. En el caso del control, donde el cultivo fue sometido únicamente a aireación sin adición de dióxido de carbono, se observó un aumento moderado en el número de células, pasando de 1,98E+05 a 2,05E+05 cel/mL, lo que corresponde a un crecimiento celular del 3,60%, como se presenta en la Figura 7.

Por otra parte, los tratamientos con dosificación de CO₂ mostraron un incremento celular más pronunciado en todas las réplicas evaluadas. Las concentraciones finales oscilaron entre 1,94E+05 y 2,66E+05 cel/mL, con porcentajes de crecimiento celular comprendidos entre el 23% y el 28%. Estos valores indican una respuesta consistente del cultivo frente a la adición de dióxido de carbono, evidenciándose un patrón de crecimiento superior al observado en el control.

El comportamiento entre réplicas fue relativamente homogéneo, lo que se manifiesta en los valores de desviación estándar registrados para el número de células, observado en la Figura 8.

Tabla 5.

Captación de dióxido de carbono: *Dunaliella salina*

Captación de dióxido de carbono: <i>Dunaliella salina</i>			
No. cel/mL			
Tratamiento	Aireación	Aireación	%Crecimiento celular
Control	1,98E+05	2,05E+05	3,60%
Réplicas	Aireación	CO₂	%Crecimiento celular
R1	1,55E+05	1,94E+05	25%
R2	2,03E+05	2,55E+05	26%
R3	2,10E+05	2,58E+05	23%
R4	2,08E+05	2,66E+05	28%
R5	1,10E+05	1,40E+05	27%
Desviación Estándar	4,37E+04	5,45E+04	1,92%

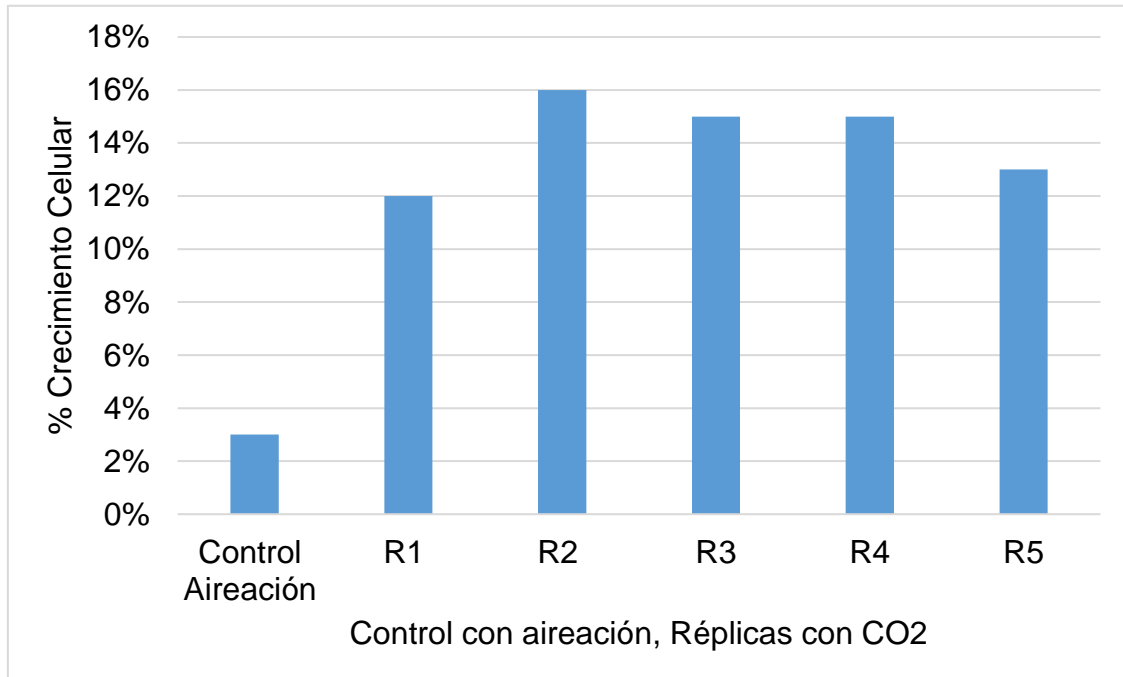
Promedio de Crecimiento Celular

26%

Elaborado por: La Autora, 2026

Figura 6

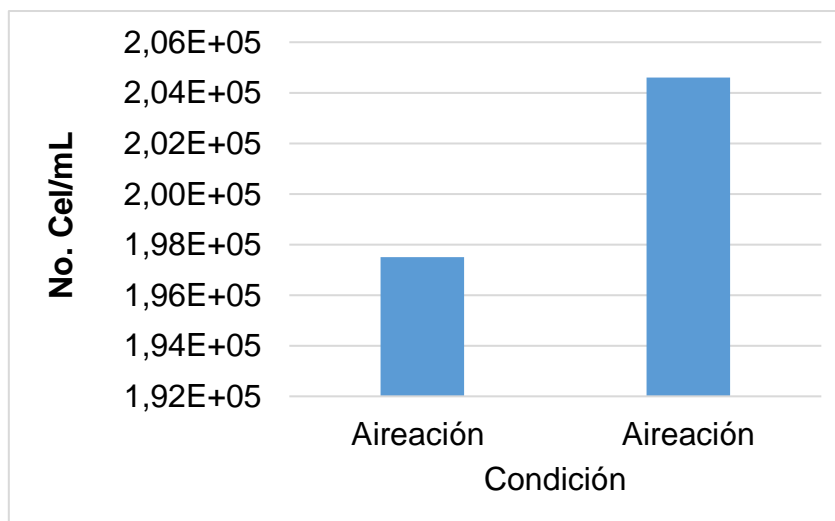
Efecto del CO₂ en el crecimiento celular microalgal en comparación con control con aireación



Elaborado por: La Autora, 2026

Figura 7

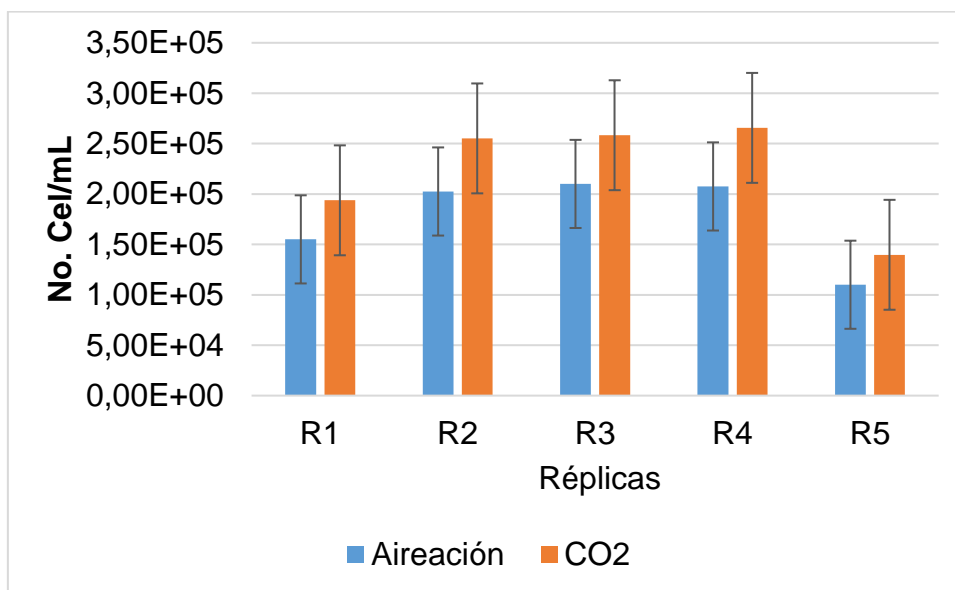
Crecimiento celular de control de *Dunaliella salina*, bajo aireación



Elaborado por: La Autora, 2026

Figura 8

Crecimiento celular de *Dunaliella salina*, (Aireación vs. Dosificación de CO₂)



Elaborado por: La Autora, 2026

4.1.3 Captación de CO₂ en *Chlorella sp*

Los resultados de la microalga *Chlorella sp.* contemplados en la Tabla 6, presentaron un aumento en la densidad celular bajo las distintas condiciones evaluadas, incluyendo el control, como se sustenta en la Figura 9. En el tratamiento control, donde se aplicó únicamente aireación, el número de células pasó de 9,50E+05 a 9,79E+05, correspondiente a un crecimiento celular del 3%, lo que demostró una variación mínima durante el periodo experimental, tal como se presenta en la Figura 10.

En los ensayos con dosificación de CO₂, las réplicas registraron incrementos más notorios en la concentración celular. Los valores finales se situaron entre 1,04E+05 y 2,09E+05 cel/mL, con porcentajes de crecimiento que variaron del 12% al 16%, indicando una tendencia de aumento en todas las réplicas.

El análisis de la dispersión de los datos muestra una variabilidad moderada en el número de células por mililitro, según los valores de desviación estándar registrados. Los porcentajes de crecimiento celular se mantuvieron relativamente próximos entre sí, lo que evidencia una respuesta uniforme del cultivo frente a la dosificación de dióxido de carbono, como se observa en la Figura 11.

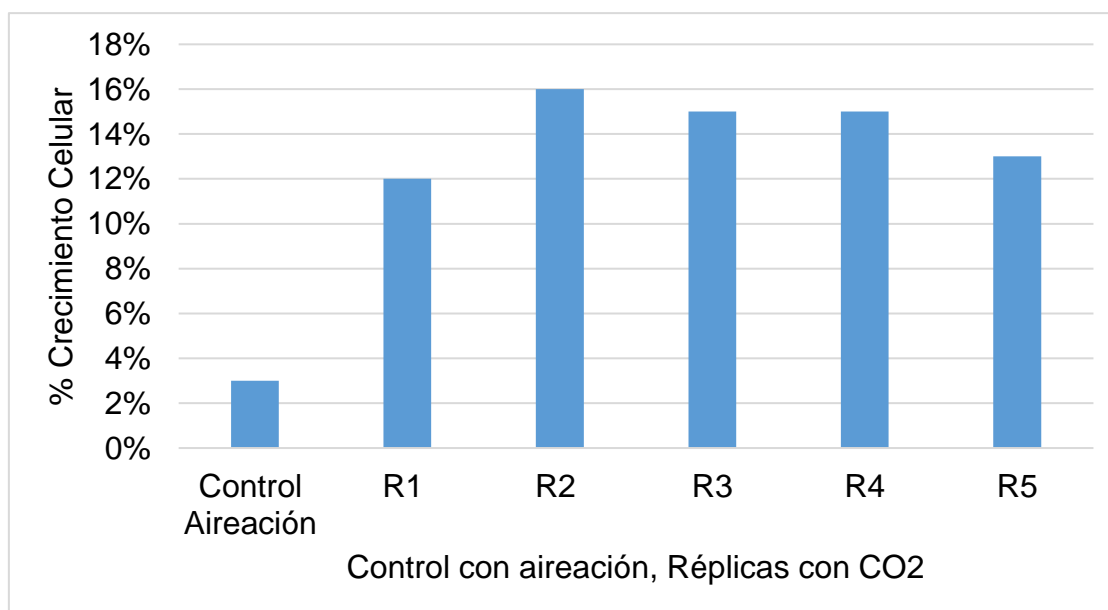
Tabla 6.

Captación de dióxido de carbono: *Chlorella sp.*

Captación de dióxido de carbono: <i>Chlorella sp.</i>			
No. cel/mL			
Tratamiento	Aireación	Aireación	%Crecimiento celular
Control	9,50E+05	9,79E+05	3,00%
Réplicas	Aireación	CO₂	%Crecimiento celular
R1	9,25E+04	1,04E+05	12%
R2	1,63E+05	1,89E+05	16%
R3	1,03E+05	1,18E+05	15%
R4	1,55E+05	1,78E+05	15%
R5	1,85E+05	2,09E+05	13%
Desviación Estándar	4,01E+04	4,61E+04	1,6%
Promedio de Crecimiento Celular			14%

Elaborado por: La Autora, 2026

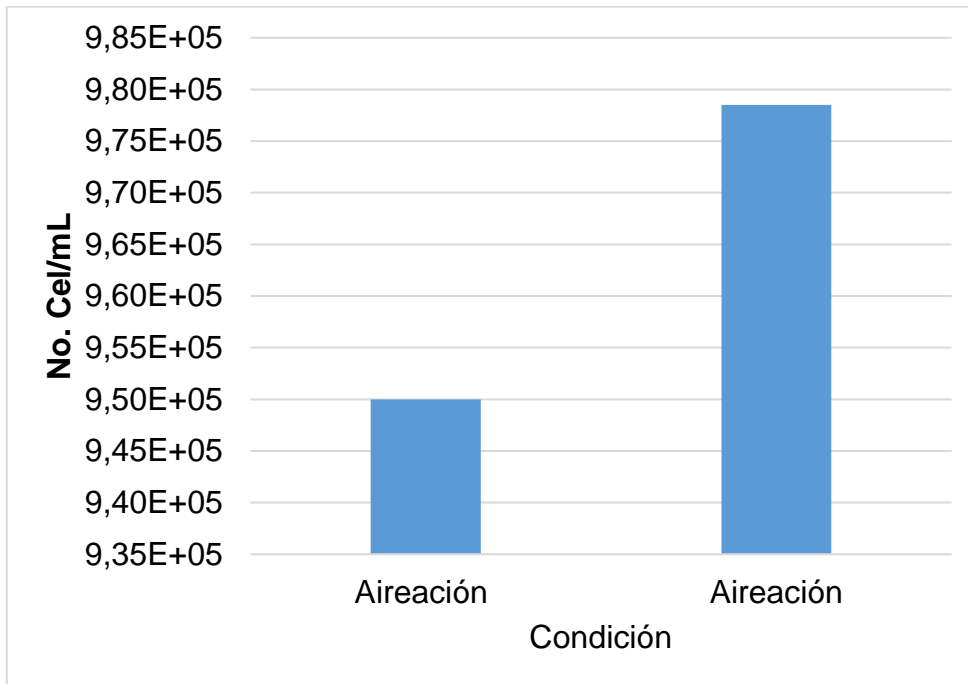
Figura 9

Efecto del CO₂ en el crecimiento celular microalgal en comparación con control con aireación

Elaborado por: La Autora, 2026

Figura 10

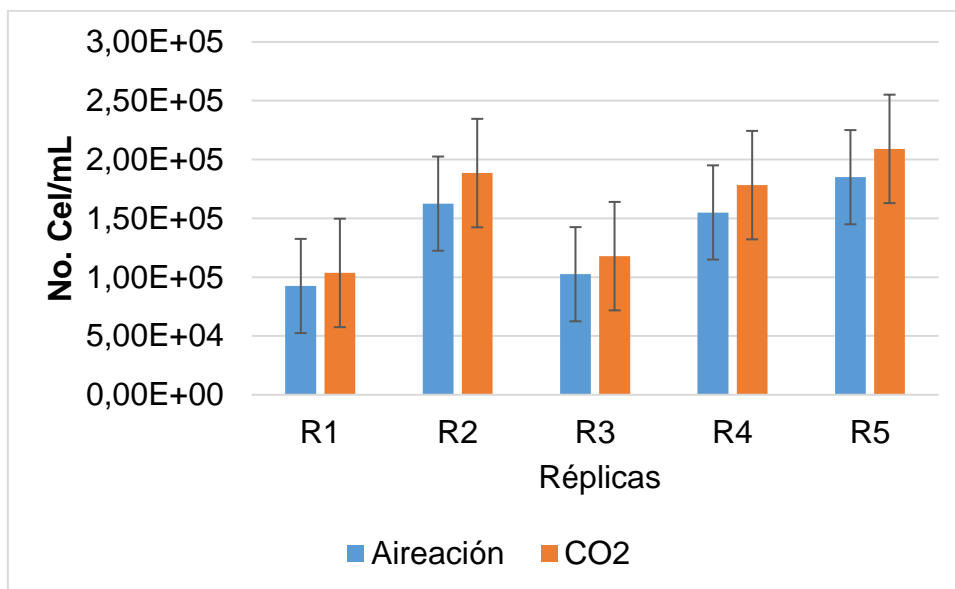
Crecimiento celular de control de *Chlorella sp.*, bajo aireación



Elaborado por: La Autora, 2026

Figura 11

Crecimiento celular de *Chlorella sp.*, (Aireación vs. Dosificación de CO₂)



Elaborado por: La Autora, 2026

4.2 Identificación de la eficiencia de la producción de biohidrógeno a partir del cultivo, por medio del análisis de la relación entre captación de CO₂ y la cantidad de biohidrógeno generado

El biohidrógeno generado bajo condiciones de aireación presentó un valor nulo en todas las réplicas de los tratamientos, ya que, en ausencia de una fuente adicional de carbono como el dióxido de carbono, no se generaron las condiciones metabólicas necesarias para la producción de H₂.

Nannochloropsis sp. presentó una producción de biohidrógeno consistente en todas las réplicas desde R1 a R5, con un valor uniforme de 0,001 ppm, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.

Producción de Biohidrógeno: Nannochloropsis sp.

Producción de Biohidrógeno: <i>Nannochloropsis sp.</i>		
	ppm	
Tratamientos	H₂ con aireación	H₂ con dióxido de carbono
Control	0	-
R1	0	0.001
R2	0	0.001
R3	0	0.001
R4	0	0.001
R5	0	0.001

Elaborado por: La Autora, 2026

En el caso de *Dunaliella salina*, se registró producción de biohidrógeno en todos los tratamientos experimentales con valores que oscilaron entre 0,008 y 0,015 ppm. La réplica 3 mostró el valor más alto (0,015 ppm), seguida de la réplica 2 (0,012 ppm); las réplicas 1 y 4 (0,011 ppm), mientras que R5 mostró el rendimiento más bajo, evidenciando estos resultados en la Tabla 8.

Tabla 8.

Producción de Biohidrógeno: *Dunaliella salina*

Producción de Biohidrógeno: <i>Dunaliella salina</i>		
Tratamientos	ppm	
	H ₂ con aireación	H ₂ con dióxido de carbono
Control	0	-
R1	0	0.011
R2	0	0.012
R3	0	0.015
R4	0	0.011
R5	0	0.008

Elaborado por: La Autora, 2026

Chlorella sp. no mostró producción detectable de hidrógeno en ninguno de los tratamientos, con niveles de hidrógeno de 0 ppm en todos los casos. Este resultado reflejó una eficiencia nula en la conversión de dióxido de carbono a hidrógeno y sugiere que, bajo las condiciones de cultivo, la cepa no activó las vías metabólicas necesarias para la producción de hidrógeno.

4.3 Estimación de la viabilidad del sistema de cultivo de microalgas para su escalabilidad industrial

El análisis de la relación costo-beneficio del sistema de cultivo de microalgas en fotobiorreactores, destinado a la producción de biohidrógeno mediante la captación de dióxido de carbono, fue evaluado a dos escalas de desarrollo: laboratorio y piloto, a efectos de estimar su viabilidad para una eventual escalabilidad industrial.

A escala de laboratorio, el sistema presentó un índice de relación costo-beneficio mayor a la unidad (2,10), lo que indica que, el sistema resulta económicamente viable en términos experimentales. Este resultado se explica principalmente por los bajos costos de inversión, debido al uso de equipos disponibles en el laboratorio, materiales de bajo costo y el suministro de cepas y medios de cultivo por instituciones de apoyo, como el CENAIM. Asimismo, el ahorro asociado a la producción propia de biomasa microalgal, frente a la compra de cepas comerciales, permitió compensar los costos operativos incurridos.

Sin embargo, a esta escala, la producción de biohidrógeno no pudo ser monetizada, porque el objetivo principal del sistema fue la validación técnica del proceso y no la generación cuantificable de energía; siendo esto presentado en la Tabla 9.

Tabla 9.

Análisis Costo- Beneficio de sistema de cultivo de microalgas (Escala de laboratorio)

Análisis de Costo-Beneficio	
Sistema de cultivos de microalgas (cepas: <i>Dunaliella salina</i> , <i>Nannochloropsis sp</i> , <i>Chlorella sp</i>), en fotobiorreactores, para producción de biohidrógeno mediante captación de dióxido de carbono. (Escala de Laboratorio)	
Costos de inversión	
Costos Directos	Valores
Cepas de microalgas, suministradas por el CENAIM	\$
Agua de mar, vitaminas para medio de cultivo, suministrado por el CENAIM	\$
Botellas de vidrio utilizadas como fotobiorreactores	\$17,5
Mangueras plásticas para aireación (alrededor de 15 metros)	\$7,5
Bomba de aire (dada por el laboratorio)	\$
Sistema de iluminación (dada por el laboratorio)	\$
Válvulas de control de línea de aire (dada por el laboratorio)	\$
Manómetro para control de presión	\$50
Tanque de dióxido de carbono (10kg) para pruebas	\$130
Recarga de dióxido de carbono	\$23
Total	\$ 228,00
Costos Indirectos	Valores
Uso de infraestructura del laboratorio (espacio físico, mesas de trabajo, tomas eléctricas)	\$

Consumo eléctrico asociado al funcionamiento de iluminación, aires acondicionados	\$	
Usos de equipos y materiales de laboratorio	\$	
Total	\$	-
Costos Estimados (VAC)		
	\$	228,00
Beneficios Tangibles		
Beneficios Financieros		Valores
Ahorro de compra de microalgas, ya que se desarrolla el proceso de biomasa de cada uno, teniendo en cuenta que el tubo de 15mL de cada cepa ronda los \$80, siendo así ese estimado por cada una	\$480	
Producción de Biohidrógeno	\$	
Total (VAN)	\$480	
Beneficios Intangibles		
Descripción del Beneficio	Área de Impacto	
Generación de conocimiento científico sobre la captación de dióxido de carbono y producción de biohidrógeno	Investigación científica	
Desarrollo de base experimental para futura escalabilidad del sistema a nivel piloto o industrial	Investigación científica	
Contribución al cumplimiento de Objetivos de Desarrollo Sostenible y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero	Ambiental	
Resultados Análisis Costo-Beneficio		
2,10		

Elaborado por: La Autora, 2026

El análisis realizado a escala piloto se presenta en la Tabla 10, donde se evidenció un índice de relación costo-beneficio inferior a la unidad (0,66), denotando que el sistema, bajo las condiciones evaluadas, no alcanza una rentabilidad económica directa. Este resultado se asoció principalmente al incremento de los costos de inversión, donde se tomaron valores aproximados que se manejan en el mercado; la adquisición e instalación del fotobiorreactor, los sistemas de conducción del dióxido de carbono y la adecuación de infraestructura

industrial. En esta etapa, los costos estructurales, tienen un impacto considerable en el balance económico del sistema. El análisis a escala piloto pone en evidencia que el sistema mantiene su viabilidad técnica y ambiental, aunque requiere procesos de mejoras para su implementación industrial.

La evaluación de la producción de biohidrógeno indicó que, si bien en estudios se reportan valores medibles de H₂ generado a partir de microalgas bajo condiciones experimentales específicas, en el presente estudio la producción fue baja y limitada a concentraciones en el orden de ppm, lo que impidió su conversión a unidades energéticas o económicas. El biohidrógeno generado no fue considerado como un beneficio financiero cuantificable dentro del análisis costo-beneficio, manteniéndose como un resultado experimental asociado al desempeño metabólico de las cepas estudiadas.

Tabla 10.

Análisis Costo- Beneficio de sistema de cultivo de microalgas (Escala Piloto)

Análisis de Costo-Beneficio	
Sistema de cultivos de microalgas, en fotobiorreactores, para producción de biohidrógeno mediante captación de dióxido de carbono. (Escala Piloto)	
Costos de inversión	
Costos Directos	Valores
Adquisición de microalgas (pudiendo ser solo una, iniciando con 1,5 Litros para masificación en FBR)	\$8.000
Fotobiorreactor considerado a pequeña escala	\$4.500
Como medio de cultivo se pueden utilizar efluentes de la empresa (aguas residuales), así mismo este proceso servirá como estrategia sostenible	\$
Sistemas de tuberías para conducción del dióxido de carbono emitido por empresas	\$2.000
Total	\$14.500
Costos Indirectos	Valores
Uso de infraestructura industrial, e implantación del fotobiorreactor	\$3.500
Total	\$3.500

Costos Estimados		\$18.000
Beneficios Tangibles		
Beneficios Financieros		Valores
Producción continua de biomasa, mantiene su crecimiento exponencial y puede duplicarse bajo condiciones óptimas		\$12.000
Producción de biohidrógeno, fuente de energía que puede ser implementada a procesos de la empresa, ahorrando consumo de energía		-
Total		\$12.000
Beneficios Intangibles		
Descripción del Beneficio		Área de Impacto
Generación de conocimiento científico sobre la captación de dióxido de carbono y producción de biohidrógeno		Investigación científica
Desarrollo de base experimental para futura escalabilidad del sistema a nivel piloto o industrial		Investigación científica
Contribución al cumplimiento de Objetivos de Desarrollo Sostenible y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero		Ambiental
Resultados Análisis Costo-Beneficio		
0,66		

Elaborado por: La Autora, 2026

Desde una perspectiva de escalabilidad industrial, los resultados indicaron que la transición de laboratorio a piloto conlleva desafíos económicos esperables, mismo que no deben interpretarse como una inviabilidad definitiva, sino como una oportunidad para el desarrollo de mejoras, tales como la sustitución de materiales de alto costo, el diseño del fotobiorreactor, la integración del sistema a la matriz energética de alguna industria y la valorización energética efectiva del biohidrógeno producido.

4.4 Análisis estadístico

4.4.1 t de Student pareada

Para evaluar si existen diferencias relevantes en los tratamientos entre la captación de dióxido de carbono y producción de biohidrógeno con aireación y con inyección de CO₂, se aplicó la prueba t de Student pareada, donde se obtuvieron los resultados descritos a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11.

Resultados de prueba t de Student pareada para la captación de CO₂ antes y después de suministro de CO₂ en las microalgas

Prueba t de Student pareada		
Tratamiento	T	P-value
<i>Nannochloropsis sp.</i>	-6,65	0,0026
<i>Dunaliella salina</i>	-8,98	0,0008
<i>Chlorella sp.</i>	-6,98	0,0022

Elaborado por: La Autora, 2026

Los resultados mostraron que sí existen diferencias significativas en la captación de CO₂, entre el proceso de aireación y dosificación de dióxido de carbono, en cada una de las cepas de microalgas estudiadas, teniendo como respuesta valores menores al nivel de significancia establecido ($p < 0,05$), 0,0026 para *Nannochloropsis sp.*, 0,0008 para *Dunaliella salina* y 0,0022 para *Chlorella sp.*; de manera que se procedió a rechazar la hipótesis nula y a aceptar la alternativa, indicando que las diferencias observadas no se debieron al azar, sino que respondieron al efecto de la dosificación de CO₂.

Así también se empleó la misma prueba, para el análisis de la producción de biohidrógeno de las microalgas, bajo proceso de aireación y dosificación de dióxido de carbono, presentando lo siguiente en la Tabla 12.

Tabla 12.

Resultados de prueba t de Student pareada para la producción de biohidrógeno antes y después de suministro de CO₂ en las microalgas

Prueba t de Student pareada		
Tratamiento	T	P-value
<i>Nannochloropsis sp</i>	-	-
<i>Dunaliella salina</i>	-10,16	0,0005
<i>Chlorella sp</i>	-	-

Elaborado por: La Autora, 2026

Debido a que la cepa de *Nannochloropsis sp.* presentó los mismos valores de producción de biohidrógeno bajo aireación y mismos valores bajo inyección de CO₂, no fue posible aplicar la prueba estadística, puesto que existió la ausencia de variabilidad de datos; sin embargo, se evidenció que la producción ocurrió únicamente después de la dosificación. Para la cepa de *Chlorella sp.* no se obtuvieron datos de generación de H₂ bajo ningún proceso, por lo tanto, tampoco fue posible realizar el análisis.

Dunaliella salina, presentó diferencias estadísticamente significativas en la producción de H₂, antes y después del suministro de CO₂, por lo que se rechaza la nula, y se acepta, la alternativa, confirmando así que la dosificación de dióxido de carbono influyó en la producción de biohidrógeno para esta cepa.

4.4.3 ANOVA

Se evaluaron 3 tratamientos, siendo: *Nannochloropsis sp.*, *Dunaliella salina* y *Chlorella sp.* (Tratamiento 1, 2 y 3 respectivamente). El crecimiento celular, fue expresado como porcentaje representado así el incremento de las cepas bajo las condiciones experimentales establecidas. Los resultados se presentan en la Tabla 13, y Figura

Tabla 13.

Resultados de crecimiento celular de tratamientos evaluados

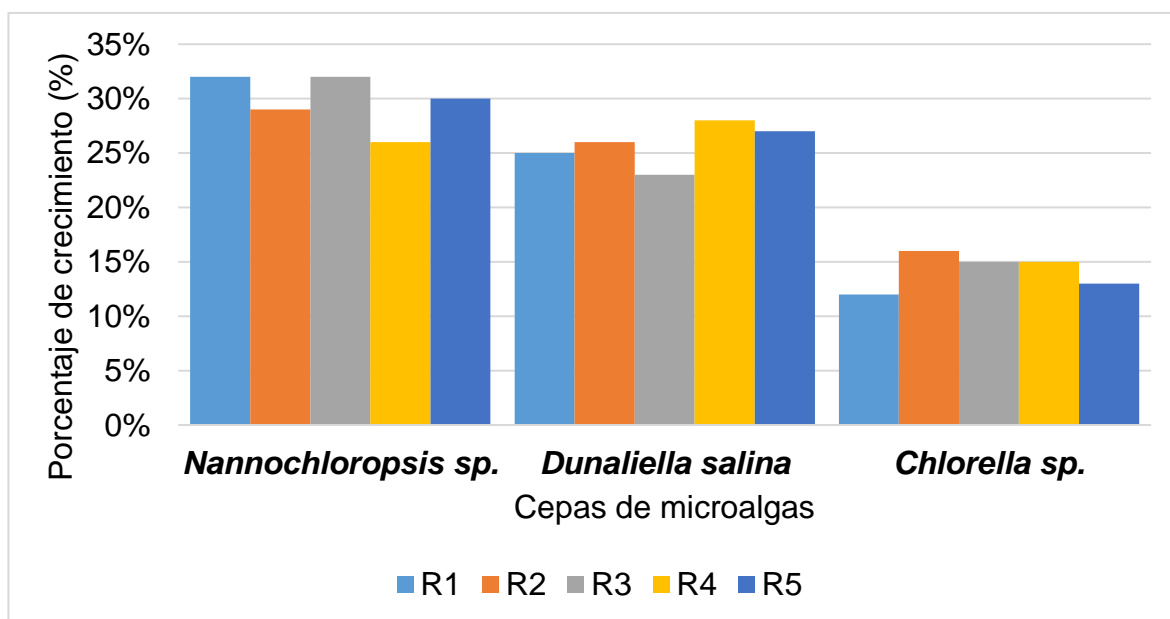
Réplicas	Tratamiento	Crecimiento Celular
1	1	32%
2	1	29%

3	1	32%
4	1	26%
5	1	30%
1	2	25%
2	2	26%
3	2	23%
4	2	28%
5	2	27%
1	3	12%
2	3	16%
3	3	15%
4	3	15%
5	3	13%

Elaborado por: La Autora, 2026

Figura 12

Resultados de crecimiento celular de tratamientos evaluados



Elaborado por: La Autora, 2026

El ANOVA, mostró que los tratamientos estudiados tuvieron efecto sobre la variable de crecimiento celular teniendo así los resultados contemplados en la Tabla 14.

Tabla 14.

Análisis de Varianza de Tratamientos

Análisis de Varianza					
Variable		Coefficiente de Variación			
Crecimiento celular		8,81			
Análisis de Varianza- SC tipo III					
F. V	SC	gl	CM	F	P-value
Modelo	0,07	2	0,03	78,16	<0,0001
Tratamiento	0,07	2	0,03	78,16	<0,0001
Error	0,01	12	4,20E-04		
Total	0,07	14			

Elaborado por: La Autora, 2026

Para el estadístico F se obtuvo un valor de 78,16, y para el p-value un valor menor a 0,0001; indicando que sí existen diferencias significativas entre los tratamientos, y el valor del coeficiente de variación con 8,81, representa que existe precisión en el experimento.

4.4.4 Prueba de normalidad Shapiro-Wilks

Se evaluó la normalidad de los datos alcanzados en el crecimiento celular de los tratamientos, por medio de los residuos normales, que son la diferencia de los valores observados y valores estimados por el modelo; presentados en la Tabla 15.

Tabla 15.

Residuos de Variable de Crecimiento Celular

Residuo: Crecimiento celular
0,02
-0,01
0,02
-0,04
0
-0,01
0

-0,03
 0,02
 0,01
 -0,02
 0,02
 0,01
 0,01
 -0,01

Elaborado por: La Autora, 2026

Para el test de normalidad se obtuvo un valor de $p= 0,1946$, de modo que, al ser mayor que 0,05, se acepta la hipótesis nula, demostrando que los datos siguen una distribución normal, como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks

Variable	n	p (Unilateral, D)
Crecimiento Celular	15	0,1946

Elaborado por: La Autora, 2026

4.4.5 Prueba de homogeneidad de varianzas

La prueba de homogeneidad de varianzas, fue aplicada para los valores de residuos absolutos, que son valores de la diferencia entre una observación y el valor estimado por parte del modelo, representado en la Tabla 17.

Tabla 17.

Residuos Absolutos de variable de Crecimiento Celular

Residuo Absoluto: Crecimiento celular
0,02
0,01
0,02
0,04
0
0,01

0
0,03
0,02
0,01
0,02
0,02
0,01
0,01
0,01

Elaborado por: La Autora, 2026

Como resultado se obtuvo que las varianzas entre los tratamientos no difieren significativamente teniendo así un valor de $p= 0,7650$, por lo que no se rechaza la nula, siendo esto presentado en la Tabla 18.

Tabla 18.

Prueba de Homogeneidad de varianzas

Análisis de Varianza					
Variable			Coefficiente de Variación		
Residuo Absoluto de Crecimiento celular			69,48		
Análisis de Varianza- SC tipo III					
F. V	SC	gl	CM	F	P-value
Modelo	6,60E-05	2	3,30E-05	0,29	0,756
Tratamiento	6,60E-05	2	3,30E-05	0,29	0,756
Error	1,40E-03	12	1,20E-04		
Total	1,50E-03	14			

Elaborado por: La Autora, 2026

4.4.6 Prueba de Tukey

Se realizó el análisis de comparaciones múltiples con un nivel de significancia de 0,05, donde se obtuvo como resultado lo presentado en la Tabla 19.

Tabla 19.

Aplicación de Prueba de Tukey

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
1	30%	5	0,01	A
2	26%	5	0,01	B
3	14%	5	0,01	C
Alfa				0,05
Diferencia Mínima Significativa				3,46%

Elaborado por: La Autora, 2026

El tratamiento 1 (*Nannochloropsis sp.*), presentó la mayor media con 30% \pm 1%, siendo superior al tratamiento 2 (*Dunaliella salina*), con 26% \pm 1%, y al tratamiento 3 (*Chlorella sp.*) con 14% \pm 1%. Cada tratamiento conformó un grupo estadístico independiente siendo A, B y C respectivamente, lo que demostró que ninguno comparte similitud estadística; además las diferencias entre medias superaron la diferencia mínima significativa, por lo que cada tratamiento presentó un comportamiento estadísticamente diferente.

4.4.7 Gráfico de Cajas y Bigotes

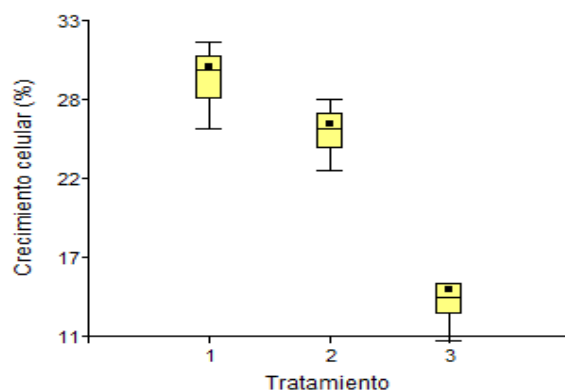
En la Figura 13, se presenta la homogeneidad existente en las réplicas y consistencia de los resultados, no se observó la presencia de valores atípicos, el tratamiento 1 (*Nannochloropsis sp.*) presentó los valores más altos de crecimiento, con datos comprendidos entre 26% y 32% y una mediana del 30%, lo que indicó que mantiene un mayor rendimiento celular, bajo dosificación de dióxido de carbono, en comparación con los demás tratamientos.

El tratamiento 2 (*Dunaliella salina*), tuvo valores que van entre 23% y 28% y una mediana del 23%, evidenciando un crecimiento menor al tratamiento, pero superior al tratamiento 3.

Chlorella sp. (tratamiento 3), mostró los valores más bajos de crecimiento celular con datos que van desde 12% hasta 16% y una mediana de 15%.

Figura 13

Distribución del porcentaje de crecimiento celular (%) en los tratamientos evaluados



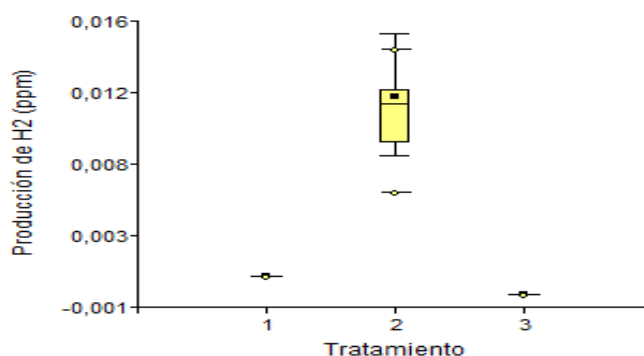
Elaborado por: La Autora, 2026

En la Figura 14, se evidencia la distribución de la producción de biohidrógeno de los tratamientos estudiados, *Nannochloropsis sp.*, *Dunaliella salina* y *Chlorella sp.*, Tratamientos 1, 2 y 3 correspondientemente.

El tratamiento 1 reflejó una producción constante de 0,001ppm, en todas las réplicas, de modo que no existe una dispersión en los datos. El tratamiento 2 presentó los valores más altos de producción de biohidrógeno, registrando valores que van desde 0,008ppm a 0,015ppm, con una mediana de 0,011ppm, con una dispersión baja, demostrando homogeneidad entre las réplicas. El tratamiento 3 no presentó producción de H₂, por lo que no existe una variabilidad de la misma en el gráfico.

Figura 14

Distribución de la producción de biohidrógeno de los tratamientos evaluados



Elaborado por: La Autora, 2026

5. DISCUSIÓN

Se evidencia que la dosificación de dióxido de carbono, incrementa el crecimiento celular en las tres cepas evaluadas, en comparación con los cultivos mantenidos bajo aireación.

En *Nannochloropsis sp.* se registra un crecimiento promedio del 30%, frente al 5% del control; *Dunaliella salina* un 26% frente al 3,60% y *Chlorella sp.*, un 14% frente al 3%, de modo que estos hallazgos concuerdan con lo señalado por Hinojosa (2012), quien manifiesta que el suministro de una fuente adicional de CO₂ en fotobiorreactores, favorece la actividad fotosintética y la acumulación de biomasa microalgal, con respecto a cultivos con aire atmosférico; confirmando así que, la captación del dióxido de carbono se demuestra directamente en el incremento celular, validando el uso del crecimiento microalgal como un indicador de biofijación de carbono.

De igual manera Ararát et al. (2023), indican que la biofijación de dióxido de carbono varía según la cepa, como se observa con los resultados alcanzados, la respuesta al CO₂ no es homogénea entre réplicas ni entre cepas, donde *Nannochloropsis sp.* muestra la mayor tasa promedio de crecimiento celular, seguida de *Dunaliella salina* y *Chlorella sp.*, con menor crecimiento sugiriendo que concentraciones elevadas de CO₂ pueden generar efectos inhibitorios sobre el metabolismo celular, presentando la necesidad de un control preciso de las condiciones operativas para maximizar la eficiencia de captación, tal como lo manifiestan Castiblanco y Sandoval (2022).

Aun cuando existió una eficiencia en la captación de dióxido de carbono por parte de las microalgas estudiadas, la producción de biohidrógeno fue limitada, sin embargo, esta se evidencia únicamente bajo condiciones de dosificación de CO₂ de manera que estos resultados son consistentes con lo señalado por Castiblanco y Sandoval (2022), quienes destacan que algunas microalgas verdes presentan una mejor adaptación a condiciones variables y una mayor capacidad asociada a la producción de hidrógeno.

Tras el suministro de dióxido de carbono se detecta una producción constante en *Nannochloropsis sp.* de 0,001 ppm en todas las réplicas, en *Dunaliella salina*, la producción de biohidrógeno es más notoria con resultados que oscilan entre 0,0008 y 0,015 ppm, *Chlorella sp.* no presenta producción detectable de H₂;

estas respuestas concuerdan con lo expuesto por Castiblanco y Sandoval (2022), quienes mencionan que los aspectos que aportan al crecimiento celular no necesariamente optimiza la producción del biohidrógeno. Aunque existe una producción de biohidrógeno para al menos dos cepas, los valores siguen siendo bajos, lo que concuerda con Aravind et al. (2024), quienes mantienen que, aunque el biohidrógeno representa una alternativa energética prometedora, esta requiere condiciones adicionales como la mejora del sistema, debido a que uno de los principales desafíos que existen se atribuye a su bajo rendimiento y a los costos que intervienen en el cultivo de las microalgas.

El análisis costo-beneficio a escala de laboratorio muestra un resultado beneficioso, evidenciando así, la viabilidad económica del sistema bajo condiciones experimentales. A nivel experimental, el índice de relación costo-beneficio es de 2,10, valor superior a la unidad, lo que representa una factibilidad económica en condiciones controladas. Esto se relaciona con lo señalado por Valera (2018), quien indica que el cultivo de microalgas presenta ventajas, tales como altas tasas de crecimiento, elevada densidad celular al operar en sistemas semicontrolados como los fotobiorreactores.

Por el contrario, al escalar el sistema a nivel piloto, la relación costo-beneficio disminuye, con un valor inferior a la unidad de 0,66, demostrando los desafíos económicos asociados a la implementación industrial de estos sistemas. Este resultado se asocia con lo reportado por la Administración de Información Energética y García (2021), quienes señalan que los métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, incluyendo sistemas biológicos, aún presentan costos superiores frente a las tecnologías convencionales basadas en combustibles fósiles. Aunque el sistema de microalgas a escala piloto no presenta una rentabilidad directa, no puede considerarse inviable absolutamente; lo cual se relaciona con lo mencionado por Ashraf et al. (2021), donde señalan que la producción y aprovechamiento de microalgas a gran escala constituye una opción con potencial para impactar diferentes sectores productivos, resaltando su idoneidad para la generación de biomasa con múltiples aplicaciones, incluyendo biocombustibles y biohidrógeno. Los resultados del estudio confirman que, el sistema mantiene viabilidad técnica y ambiental, pese a que requiere perfeccionar aspectos para tener una sostenibilidad económica, siendo esto respaldado por la postura de Alanazi et al. (2023), quienes enfatizan que la optimización del diseño

del fotobiorreactor, puede lograrse buscando rutas como el uso de efluentes industriales y la integración directa con fuentes emisoras de CO₂ para mejorar el desempeño económico del proceso, centrándose en la necesidad de desarrollar avances eficientes para alcanzar una competitividad a nivel de industrial.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La determinación de la captación de CO₂ evaluada a partir del crecimiento celular evidenció que la dosificación de dióxido de carbono tuvo un efecto positivo en el desarrollo de los cultivos microalgales. Siendo así que, *Nannochloropsis sp.* presentó un promedio de crecimiento de 30%, *Dunaliella salina*, alcanzó un alto incremento celular, con un promedio de 26% y *Chlorella sp.* mostró una respuesta menos eficiente ante la adición de CO₂ con un incremento promedio de 14%.

La eficiencia en la producción de biohidrógeno evidenció que, bajo condiciones de aireación, no se generó hidrógeno en ninguna de las cepas. Con la adición de CO₂, *Nannochloropsis sp.* presentó una producción constante de 0,001 ppm para todas las réplicas, *Dunaliella salina* tuvo una respuesta más beneficiosa, con valores variables entre réplicas y el mayor rendimiento, con valores que oscilan desde 0,008 hasta 0,015 ppm; mientras que *Chlorella sp.* no registró producción detectable en ningún tratamiento.

La estimación de la viabilidad del sistema de cultivo de microalgas dio a conocer que, a escala de laboratorio el sistema resulta rentable, porque se obtuvo un valor de 2,10 en el análisis costo-beneficio; a diferencia de la escala piloto, donde el incremento de los costos estructurales reduce la rentabilidad económica directa, con un valor de 0,66.

Se aceptaron las hipótesis alternativas para el proceso de captación y producción de biohidrógeno, ya estadísticamente sí existieron diferencias significativas en cuanto a resultados, antes y después de la dosificación de dióxido de carbono, lo cual respalda la idea a defender indicando que el sistema permitió una eficiente captación de CO₂ y una producción medible de biohidrógeno, constituyendo una alternativa viable para mitigar emisiones industriales y generar energía limpia.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda para futuros estudios profundizar en la evaluación de los distintos parámetros que influyen en la fijación de dióxido de carbono por parte de las microalgas, tales como la concentración de CO₂, la intensidad lumínica, el pH,

la disponibilidad de nutrientes y las condiciones de aireación, puesto que permitiría mejorar el crecimiento celular y el desempeño del cultivo.

Se sugiere investigar las diferentes rutas metabólicas involucradas en la producción de biohidrógeno e identificar el método más adecuado para las cepas de microalgas utilizadas.

Se recomienda que estudios próximos, se centren en la optimización del diseño del sistema a escala piloto, considerando el uso de materiales de menor costo y tecnologías accesibles que den paso a la reducción de la inversión inicial, evaluando también alternativas de aprovechamiento de la biomasa microalgal.

BIBLIOGRAFÍA

- Alanazi, M., Ardo, F., Al-Zahrani, A., Cheng, C., Chi-Wei, J., Hossain, S., y Yi-Ming, S. (2023). Epítome de la producción de biohidrógeno a partir de microbios: desafíos críticos frente a oportunidades. *Investigación Ambiental*, 227. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115780>
- Al-Tohamy, R., Elsamahy, T., Jiao, H., Kornaros, M., Manthos, G., Pispas, K., y Tsigkou, K. (2024). Recent advances in sustainable hydrogen production from microalgae: Mechanisms, challenges, and future perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 270. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115908>
- Alvarez, X., y Mercado, I. (2022). Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético. En P. d. Desarrollo (Ed.). Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Amat, J. (s.f.). *Análisis de la homogeneidad de varianza (homocedasticidad)* . Obtenido de Ciencia de datos: https://www.cienciadedatos.net/documentos/9_homogeneidad_de_varianza_homocedasticidad
- Anumudu, C., Miri, T., y Onyeaka, H. (2021). Minimizar la huella de carbono mediante microalgas como captura biológica. *Ciencia y tecnología de captura de Carbono*, 1. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100007>
- Appinio. (08 de 2024). Appinio. Obtenido de ¿Qué es la prueba ANOVA? Definición, tipos y ejemplos: <https://www.appinio.com/en/blog/market-research/analysis-of-variance-anova-test>

- Ararát, M., Sanclemente, O., y Vergara, L. (2023). Biofijación de CO₂ por dos especies de microalgas cultivadas en fotobiorreactores. *Acta Biológica Colombiana*, 28(1). doi:<https://doi.org/10.15446/abc.v28n1.90353>
- Aravind, D., Baskaran, R., Kean, W., Kishore, V., Rathi, S., y Sheng, L. (2024). Sustainability considerations in bio-hydrogen from bio-algae with the aid of bio-algae cultivation and harvesting: Critical review. *MRS Energy & Sustainability*, 11, 317-342. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1557/s43581-024-00096-0#citeas>
- Arroyo, M., y Ramírez, A. (2020). Dióxido de carbono, sus dos caras. *Anales de Química*, 116(2). Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8109260.pdf>
- Arumugam, A., Jeoly, K., Rupesh, K., Sivaranjani, R., Sowmiya, K., y Sudalai, S. (2023). A comprehensive review on biohydrogen production pilot scale reactor technologies: Sustainable development and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(62). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.161>
- Ashraf, O., Chang, C., Chew, K., Leong, H., Loke, P., y Peter, A. (2021). Prospects of Industry 5.0 in algae: Customization of production and new advance technology for clean bioenergy generation. *Energy Conversion and Management: X*, 10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100048>
- Ayala, Y., Colina, M., Martinez, M., y Vera, A. (2007). *Chlorella* sp. cultivada en medios con el exudado gomoso de *Prosopis juliflora* D.C. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/273003630_Chlorella_sp_cultivad_a_en_medios_con_el_exudado_gomoso_de_Prosopis_juliflora_DC

- Barsanti, L., y Gualtieri, P. (2006). *Algae: Anatomy, biochemistry; and biotechnology*. Pisa: Taylor & Francis Group. Obtenido de https://is.muni.cz/el/1431/jaro2013/Bi9535/um/ALGAE_ANATOMY_BIOCHEMISTRY_BIOTECHNOLOGY.pdf
- Benedetti, M., Osto, L. D., y Vecchi, V. (2018). Biomass from microalgae: the potential of domestication towards sustainable biofactories. *Microb Cell Fact*, 17(173). doi:<https://doi.org/10.1186/s12934-018-1019-3>
- Borowitzka, M. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology*, 70, 313-321. doi:[https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00083-8)
- Caetano, N., Correa, P., Gorgich, M., Morais, A. M., y Mata, T. (2020). Microalgas para aplicaciones biotecnológicas: Cultivo, cosecha y procesamiento de biomasa. *Acuicultura*, 528(15). doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735562>
- Carbon Neutral. (2025). Tipos de biocombustibles. *Carbon Neutral*. Obtenido de <https://www.carbonneutralplus.com/que-son-los-biocombustibles/#:~:text=Biocombustibles%20de%20tercera%20generaci%C3%B3n&text=Se%20trata%20de%20cultivos%20caracterizados,emisores%20industriales%20o%20captura%20atmosf%C3%A9rica>.
- Castiblanco, O., y Sandoval, J. (2022). Revisión del potencial de obtención de biohidrógeno a partir de microalgas en Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 16(32). doi:<https://doi.org/10.31908/19098367.2798>
- Castillo, E. (2020). Evaluación de la capacidad de captura de dióxido de carbono mediante el uso de *Scenedesmus* sp. utilizando agua residual industrial como medio de cultivo. *Tesis de grado*. Escuela Agrícola

Panamericana, Honduras. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/6dc756bf-98e1-42e2-b69e-560bea27fe93/content>

Castro, L., Forster, T., Gustavo, W., Mudhoo, A., y Ziero, H. (2021). Avances, tendencias y actualizaciones de la investigación sobre la tecnología de digestión anaeróbica: un análisis bibliométrico. *Revista de Producción más Limpia*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130004>

Chang, J., Show, P. L., TC, C., CY, H., SH, T., Ch, N. D., . . . WN. (2017). Fotobiorreactores. *En Desarrollos actuales en biotecnología y bioingeniería: Bioprocesos, biorreactores y controles*. Elsevier Inc. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63663-8.00011-2>

Chisti, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, 26(2). doi:<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.12.002>

Código Orgánico del Ambiente. (2017). Obtenido de https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf

Cognita Conecta. (2023). Evaluación del crecimiento de microalgas: Métodos de conteo celular, densidad óptica y concentración de biomasa. *Cognita Conecta*. Obtenido de <https://cognitaconecta.com/crecimiento-de-microalgas/>

Constitución de la república del Ecuador. (2008). Obtenido de https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf

- Cullispuma, J. (2021). Estado del arte de la matriz energética y análisis de la conveniencia del Programa Nacional de Biocombustibles para Ecuador. *Tesis de grado*. Universidad Central de Ecuador, Quito. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/05f04c00-80ae-4532-b83b-411400c5fc92/content>
- Dumur, D., Filalli, R., López, F., Pareau, D., y Tebbani, S. (2020). Biofijación de CO₂ por microalgas. *Trabajo de Investigación*. Obtenido de <https://hal.science/hal-03106554v1>
- Esquivel, M. (abril de 2025). *Diseño Experimental: Definición y Ejemplos*. Obtenido de Tesis y Másters: <https://tesisymasters.com.co/disenio-experimental/>
- Fogg, G., y Thake, B. (1987). *Cultivos de algas y ecología del fitoplancton*. Londres: The University of Winsconsins Press Ltd.
- Fu, J., Fu, Q., Huang, L. Q., Yun, Xia, A., y Zhu, X. (2019). Diseño de fotobiorreactores para microalgas: una revisión desde el punto de vista de la transferencia y conversión de CO. *Bioresource Technology*, 292. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121947>
- García, N. (2021). *Industria del hidrógeno verde*. Biblioteca Nacional de Chile. Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32538/1/BCN___Hidrogeno_verde_Costos_de_produccion_Sept21.pdf
- Gavara, J. (2024). *Explorando ciencia de datos*. Obtenido de Estadística con R (IV): Prueba de Tukey para Comparaciones Múltiples: <https://joseignaciogavara.com/estadistica-con-r-iv-prueba-de-tukey-para-comparaciones-multiples/?i=1>

- Genia Bioenergy. (sf). *El biohidrógeno como opción para alcanzar la neutralidad climática*. Obtenido de Genia Bioenergy: <https://geniabioenergy.com/biohidrogeno-y-neutralidad-climatica/>
- Giraldo, A. (2013). Evaluación de cepas de microalgas para captura de CO₂. *Tesis de grado*. Universidad EAFIT, Medellín. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10784/7377>
- Gracia, X. (2021). La Generación Distribuida y las Fuentes Renovables de energía en el Ecuador. *Dominio de las Ciencias*, 7(3). Obtenido de <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/1973>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2024). *Informe Cambio Climático 2024*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/2024/>
- Guillén, V., y León, A. (2020). Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construído*, 20(3). doi:<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>
- Han, J., Kamber, M., y Pei, J. (2012). *Minería de datos: conceptos y técnicas*. Morgan Kaufmann. Obtenido de <https://booksite.elsevier.com/9780123814791/>
- Hibberd, D. (2023). *Manual de alimentos y piensos elaborados a partir de microalgas*. (E. Jacobs-Lopes, M. Quiroz, M. Manzoni, y L. Queiroz, Edits.) Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/book/9780323991964/handbook-of-food-and-feed-from-microalgae>
- Hinojosa, M. (2012). Evaluación del efecto del CO₂ en el crecimiento y composición bioquímica de tres microalgas en condiciones de fotobiorreactor. *Tesis*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C., Chihuahua.

Obtenido de
https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2251/1/TESIS%20MONICA%20HINOJOSA%20Tesis%20Monica%20Hinojosa%20Castan_eda2012.pdf

Industrial Plankton. (2023). *Nutrientes*. Obtenido de Industrial Plankton:
<https://industrialplankton.com/2023/02/14/algae-growth-nutrients/>

Instituto de la Economía Digital de la Escuela Superior de Investigación Comercial.
(5 de septiembre de 2022). *Industria 5.0: lo que significa y sus beneficios*.
Obtenido de ICEMD: <https://icemd.esic.edu/knowledge/articulos/industria-5-0-lo-que-significa-y-sus-beneficios/>

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). Boletín Técnico. *Módulo de Información Económica Ambiental en empresas ENESEM*.

Jalalah, M., Jingyuan, W., Xiaogang, H., y Zheng, Y. (2022). Crecimiento de microalgas acoplado al tratamiento de aguas residuales en sistemas abiertos y cerrados para la generación avanzada de biocombustibles. *Conversión de biomasa y borrefinería*, 12.
doi:<https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-020-01061-w>

Kannan, G., y Sathyaprakasan, P. (2015). International Journal of Environmental Science and Development. *Economics of BioHydrogen Production*, 6(5).
Obtenido de
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=fb99be4490ebc119cb73cb916d61ee8a954f1ab4>

Kim, S.-H., Kumar, A., Ranganathan, P., Sirohi, R., y Tuan, A. (2022). Recent advances in computational fluid dynamics (CFD) modelling of

photobioreactors: Design and applications. *Bioresource Technology*, 350.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126920>

Lefsrud, M., Loganathan, B., y Orsat, V. (2018). Factores que afectan el crecimiento de diversas especies de microalgas. *Sage Journals*, 35(10).
doi:<https://doi.org/10.1089/ees.2017.0521>

Ley orgánica de eficiencia energética. (2019). Obtenido de <https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2024-08/Ley%20Organica%20Eficiencia%20Energ%C3%A9tica%20Ultima%20Rforma%20R.O.%20475.pdf>

Mallawarachchi, S., Nikolov, Z., Soto, L., y Wilken, L. (2021). Desarrollo de procesos de hidrolizados de proteínas de algas generados enzimáticamente para aplicaciones alimentarias especiales. *Investigación de algas*, 55.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102248>

Ministerio de Energías y Minas. (2023). Balance Energético Nacional. Obtenido de https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2024/08/BEN_2023-final_compressed.pdf

Monteiro, C. (2010). Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. Organización Latinoamericana de Energía. Obtenido de Organ.

Montevirgen, K. (3 de julio de 2024). *Britannica Money*. Obtenido de Sector industrial: Invertir en grandes empresas que hacen grandes cosas: <https://www.britannica.com/money/what-is-compounding>

Ngeh, G., Parab, H., Sathinathan, P., Yusoff, R., y Vello, V. (2023). Diseño de fotobiorreactores y parámetros esenciales para el cultivo de algas utilizando

aguas residuales industriales: una revisión. *Reseñas de energía renovable y sostenible*, 173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113096>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1989).

La producción de alimento vivo y su importancia en acuicultura una diagnosis. Obtenido de <https://www.fao.org/4/ab473s/AB473S00.htm#TOC>

Pablo, M. (22 de noviembre de 2024). *Más ganancias, menos riesgos. Calcula el costo beneficio de tu proyecto*. Obtenido de TiendaNube: <https://www.tiendanube.com/blog/costo-beneficio/>

Pakshirajan, K., y Shiharoy, A. (2020). Celdas de combustible microbianas basadas en algas para el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de productos de valor añadido. *Reseñas sobre energías renovables y sostenibles*, 132. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110041>

Pascual, M., y Sanz, C. (2020). La conjunción del Derecho y la ciencia para la determinación de la sostenibilidad de las energías renovables en el futuro paradigma energético de Europa. *Revista del Centro de Estudios en Bioderecho, Ética y Salud*, 12. doi:<https://doi.org/10.6018/bioderecho.461081>

Sax, S. (23 de septiembre de 2024). *Cómo la industria del cemento está creando materiales de construcción con huella de carbono negativa*. Obtenido de Time: <https://time.com/7023365/cement-concrete-climate/>

Valera, J. (2018). Estudio de viabilidad técnico-económica de una planta de producción de microalgas con fines de valoración energética. *Tesis*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Obtenido de https://oa.upm.es/49715/1/TFG_JAIME_VALERA_CALLEJO.pdf

VVA Industrial. (sf). *Medidor de hidrógeno en agua*. Obtenido de VVA Industrial:

<https://vva-industrial.net/medidor-de-agua/medidor-de-hidrogeno-en-agua/>

Zhu, X.-G., Long, S. P., y Ort, D. R. (2008). ¿Cuál es la máxima eficiencia con la

que la fotosíntesis puede convertir la energía solar en biomasa? *Opinión*

Actual en Biotecnología, 19(2).

doi:<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.004>

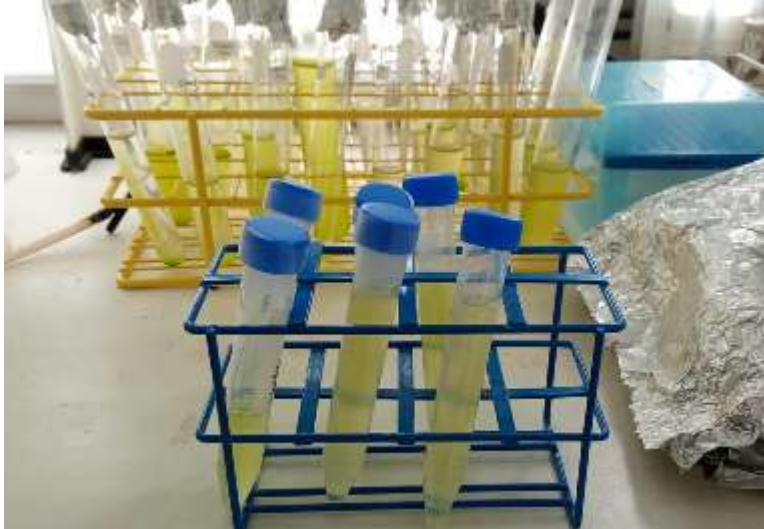
ANEXOS

Anexo N°1.

Adquisición de microalgas para el estudio

Figura 15

Microalgas suministradas por el CENAIM



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 16

Adquisición de microalgas suministradas por el CENAIM



Elaborado por: La Autora, 2025

Anexo N°2.

Preparación de medio de cultivo

Figura 17

Elaboración de medio de cultivo para las microalgas



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 18

Evidencia de cantidad de microalgas inicial (30 mL) por cepa



Elaborado por: La Autora, 2025

Anexo N°3.

Materiales empleados bajo proceso de esterilización

Figura 19

Esterilización de materiales



Elaborado por: La Autora, 2025

Anexo N°4.

Inoculación de cepas en FBR y masificación

Figura 20

Fase de masificación bajo condiciones controladas de laboratorio



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 21

Proceso de masificación



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 22

Crecimiento celular visto bajo microscopio



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 23

Resiembra de las cepas de microalgas en FBR



Elaborado por: La Autora, 2025

Anexo N°5.

Presentación de tratamientos y controles de cepas

Figura 24.

Tratamientos y controles



Elaborado por: La Autora, 2026

Anexo N°6.

Método de recolección de gas

Figura 25.

Elaboración de método de recolección de gas



Elaborado por: La Autora, 2026

Figura 26

Ajuste del sistema previo a dosificación de dióxido de carbono



Elaborado por: La Autora, 2026

Anexo N°7.

Inyección de dióxido de carbono a sistema microalgal

Figura 27

Dosificación de dióxido de carbono al sistema



Elaborado por: La Autora, 2026

Anexo N°8.

Matriz de operacionalización de Variables Independientes

Variables Independientes			
Variable	Tipo	Nivel de medida	Descripción
Tipo de microalgas	Cualitativa	Nominal	Se categoriza según la especie.
Concentración de CO ₂	Cuantitativa	Intervalo	Se mide en porcentaje (%) de gas suministrado al fotobiorreactor.
Tiempo de cultivo	Cuantitativa	Ordinal	Se registra en días.

Elaborado por: La Autora, 2025

Anexo N°9.

Matriz de operacionalización de Variables Dependientes

Variables Dependientes			
Variable	Tipo	Nivel de medida	Descripción
Eficiencia de la captación de CO ₂	Cuantitativa	Intervalo	Porcentaje de crecimiento celular con respecto a aireación y dosificación de CO ₂
Producción de biohidrógeno	Cuantitativo	Intervalo	Volumen de gas producido, medido al final del cultivo.

Elaborado por: La Autora, 2025