



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN
GEOLÓGICA Y ENERGÉTICA

Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable



EL NUEVO
ECUADOR III

Instituto de Investigación
Geológica y Energética



AUTORES:

Danny Sinche Arias
Michelle Romero Escobar
Paola Cuji Alegría
Brigitte Rivilla Cueva
Fernanda Flores Enriquez
Paola Quintana Villacis

REVISIÓN ORTOTIPOGRÁFICA:

Alexis Zaldumbide Manosalvas
Alex Polanco Chévez

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN:

Cristian Espinosa Velastegui

COLABORADORES:

Sebastián Espinoza Echeverría
Óscar Estévez Guerrero
Diego Chulde Chulde

ISBN:

978-9942-7401-1-3

© Instituto de Investigación Geológico y Energético.

Av. de la República E7-263 y Diego de Almagro - Edificio Sky, Planta baja

Código Postal: 170518 / Quito - Ecuador

www.geoenergia.gob.ec

La reproducción parcial o total de esta publicación, en cualquier forma y por cualquier medio mecánico o electrónico, está permitida siempre y cuando sea autorizada por los editores y se cite correctamente la fuente.



Esta publicación cuenta con la colaboración de la Cooperación Española a través de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) y no refleja, necesariamente, la postura de la AECID.

**DISTRIBUCIÓN GRATUITA
PROHIBIDA SU VENTA**



**EL NUEVO
ECUADOR**

Instituto de Investigación
Geológico y Energético



Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable



Cap. 01



Cap. 02



Cap. 03



Cap. 04



Cap. 05

Índice

Presentación	9
Agradecimiento	10
Introducción	11
Capítulo 1: Microalgas, tecnología y aplicaciones	13
1.1 Microalgas: características y ventajas	14
1.2 Fotobiorreactores: tipos y funcionamiento	16
1.3 Captura de carbono: conceptos y tecnologías	18
1.4 Biocombustibles: definición y tipos	20
Capítulo 2: Metodología para estudios de captura de carbono	25
2.1 Selección de la microalga	26
2.2 Condiciones óptimas de operación	28
2.3 Consideraciones para el dimensionamiento de fotobiorreactores tubulares	33
Capítulo 3: Proceso de captura de carbono	45
3.1 Biofijación de dióxido de carbono con microalgas	46
3.2 Cálculo de la biofijación de carbono	54
Capítulo 4: Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal de <i>Chlorella sp.</i>, utilizando fotobiorreactores	57
4.1 Mejores condiciones de crecimiento en laboratorio	60
4.2 Inoculación y escalamiento del cultivo	60
4.3 Masificación del cultivo en el prototipo	63
4.4 Biofijación de CO ₂ de gases de combustión de termoeléctrica	67
Capítulo 5: Perspectivas futuras para la biofijación de CO₂	71
Bibliografía	77



Índice de figuras

Figura 1: Concentración atmosférica global de dióxido de carbono 1990-2024.....	12
Figura 2 : Fijación de CO ₂ para formar carbohidratos y otros compuestos.....	14
Figura 3: Fotobiorreactor abierto tipo estanque (<i>raceway</i>).....	16
Figura 4: Fotobiorreactor cerrado tipo tubular	17
Figura 5: Esquema de transformación de la luz solar en energía química.....	19
Figura 6: Ciclo de Calvin	20
Figura 7: Esquema de las rutas de conversión de la biomasa microalgal a energía	21
Figura 8: Esquema de producción de biodiesel por transesterificación de aceite de microalga..	22
Figura 9: Ilustración del uso de hythane en un vehículo.....	24
Figura 10: <i>Chlorella sp.</i>	26
Figura 11: <i>Spirulina</i>	28
Figura 12: <i>Scenedesmus</i>	28
Figura 13: <i>Nannochloropsis</i>	28
Figura 14: Ensayos de optimización, parámetro de estudio: Intensidad de luz.....	31
Figura 15: Esquema básico del fotobiorreactor tubular	34
Figura 16: Trayectoria de la luz y ciclos luz/oscuridad dentro de un fotobiorreactor tubular .	34
Figura 17: Esquema del receptor solar para el cálculo del número de pasos.....	35
Figura 18: Parámetros de forma para el tanque de desoxigenación (<i>downcomer</i> y <i>riser</i>)	39
Figura 19: Inyector con efecto Venturi	41
Figura 20: Configuración recomendada para el inyector Venturi en el fotobiorreactor.....	42
Figura 21: Carta de Moody para determinar el factor de fricción.....	43
Figura 22: Curva de crecimiento típica para una población de microalgas, en la cual se indican las diferentes fases. Número logarítmico de la cantidad de células de microalgas en el cultivo vs. Tiempo.....	55
Figura 23: Fotobiorreactor prototipo de 1000 litros implementado por el IIGE	58
Figura 24: Equipo de investigación responsable del “Estudio de captura de carbono para la pro- ducción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal de <i>Chlorella sp.</i> , utilizando fotobiorreactores”	59
Figura 25: Fertilizante comercial (N, P, K y vitaminas) utilizado para los cultivos.....	60
Figura 26: Preparación de inóculo para las pruebas de laboratorio	60



Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable

Figura 27: Preparación de inóculos en sistemas de cultivos cerrados tipo reactores tubulares .	61
Figura 28: Preparación de inóculos en un sistema de cultivo abierto raceway de 200 litros...	62
Figura 29: Escalamiento del cultivo realizado en el “ <i>Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal de Chlorella sp., utilizando fotobiorreactores</i> ”	62
Figura 30: Preparación de la solución acuosa de medio de cultivo	63
Figura 31: Homogenización del medio de cultivo con el inóculo en el fotobiorreactor	64
Figura 32: Cultivo de microalgas en el segundo día	64
Figura 33: Cultivo de microalgas en el séptimo día	64
Figura 34: Cultivo de microalgas durante el período comprendido entre el día 14 y el día 21....	64
Figura 35: Toma de muestra del cultivo para medición de la concentración celular	65
Figura 36: Extracción del cultivo hacia un sedimentador	65
Figura 37: Pasta de microalgas obtenida tras la sedimentación del cultivo	65
Figura 38: Secador de pasta de microalga implementado en el proyecto	66
Figura 39: Bandejas con microalgas secas tras el proceso de secado	66
Figura 40: Biomasa de <i>Chlorella sp.</i> generada en el proyecto	66
Figura 41: Módulo de captación de gases de combustión implementado en el proyecto.....	67
Figura 42: Prototipo para pruebas de fijación de CO ₂ realizadas en la Central Térmica Gualberto Hernández de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ)	68
Figura 43: Cultivo de <i>Chlorella sp.</i> alimentado con gases de combustión de la Central Térmica Gualberto Hernández de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ)	68
Figura 44: Equipo técnico responsable de las pruebas de biofijación de CO ₂	69
Figura 45: Visita de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo al fotobiorreactor prototipo	70



Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de los diferentes tipos de sistemas de cultivo de microalgas.....	18
Tabla 2: Tolerancia a CO ₂ en varios géneros y especies de microalgas.....	46
Tabla 3: Resumen de los efectos positivos y negativos de los compuestos gaseosos de combustión en los cultivos de microalgas y su impacto recíproco.....	50
Tabla 4: Eficiencia de la captura de CO ₂ por diversas especies de microalgas bajo distintas condiciones experimentales.....	53

The background of the entire image is a vibrant green, filled with numerous circular, glowing microalgae cells of varying sizes. Some cells are in sharp focus, showing their internal structure, while others are blurred in the foreground and background, creating a sense of depth. The cells are distributed across the frame, with a higher concentration in the bottom right and top left corners.

Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable

Presentación

PhD. Vicente Sebastián Espinoza Echeverría
Director Ejecutivo del IIGE



El Instituto de Investigación Geológica y Energética (IIGE), es un Instituto Público de Investigación adscrito al Ministerio de Energía y Minas (MEM), su misión es la de *“generar y promover conocimiento en el ámbito de la geología y la energía, mediante investigación científica, asistencia técnica y servicios especializados para el aprovechamiento responsable de los recursos renovables y no renovables, contribuyendo a la toma de decisiones en beneficio de la sociedad”*.

Mediante la colaboración financiera del Gobierno español a través de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), fue posible la ejecución del proyecto denominado *“Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal, Chlorella Sp, empleando fotobiorreactores”*.

En Ecuador, la biomasa tiene potencial para diversificar la matriz energética, reducir la dependencia de combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero; es así que, el apoyo de AECID ha sido funda-

mental para el fortalecimiento de la investigación en la generación de energía renovable a través de la biomasa y de esta manera el desarrollo del Ecuador.

El presente documento expone aspectos teóricos sobre el uso de microalgas y el desarrollo del proyecto *“Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal, Chlorella Sp, empleando fotobiorreactores”* gestionado por el IIGE, lo que ha permitido la masificación de microalgas utilizando el CO₂ como fuente de carbono para la obtención de biocombustible. El prototipo desarrollado ha permitido estudiar nuevas tecnologías para la obtención de energía renovable de tercera generación y mitigación de cambio climático.

Ecuador cuenta con una amplia biodiversidad, por ello posee un potencial energético oculto que está comenzando a captar la atención de expertos e investigadores; de ahí, la importancia de continuar desarrollando investigación en biomasa, transformando los residuos en una fuente de energía limpia y renovable, contribuyendo así a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y potenciando el desarrollo económico del país.

Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable



Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable

Agradecimiento

LOS autores agradecen el aporte financiero al proyecto “Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal, *Chlorella Sp*, empleando fotobiorreactores”, por parte de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y a la Embajada de España en Ecuador.

Así mismo, agradecemos a la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), por la apertura para que la investigación planteada en el proyecto se haya podido realizar en las instalaciones de la termoeléctrica Gualberto Hernández. A CELEC EP TRANSELECTRIC por su cooperación para el uso de sus instalaciones en las actividades de investigación que se realizan en el Laboratorio de Biomasa del IIGE.

A los directivos del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), por el apoyo brindado en la ejecución de actividades técnicas y elaboración de este libro.





Introducción

El consumo masivo de combustibles fósiles ha generado una liberación excesiva de gases de efecto invernadero a nivel mundial, particularmente dióxido de carbono (CO₂), lo que ha causado serios daños al medio ambiente y alteraciones climáticas perjudiciales para la humanidad [1]. La batalla contra el cambio climático, uno de los retos más grandes a nivel mundial, ha llegado a su momento más crítico [2], ya que, de acuerdo con la Oficina de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés), el 2023 se destacó como uno de los años más calurosos en la historia registrada [3].

En septiembre 2024, la concentración promedio mundial de CO₂ fue de 422,03 ppm. En el periodo de enero a septiembre de 2024, el nivel más alto de CO₂ se registró en junio, con 426,91 ppm. Este valor es un 20 % superior al registrado en junio de 1990 [4] (Figura 1). Lo expuesto anteriormente pone de manifiesto un aumento significativo en las concentraciones de CO₂ a lo largo de las décadas.

La Revolución Industrial es ampliamente reconocida como un hito crucial que provocó un cambio radical en la concentración de CO₂ en la atmósfera. El uso masivo de combustibles fósiles, tales como el carbón y el petróleo, para abastecer las crecientes demandas de energía durante este periodo impulsó de manera significativa las emisiones de este

gas de efecto invernadero. A su vez, el rápido crecimiento de la producción industrial y el auge del transporte motorizado generaron una fuerte presión sobre los ecosistemas, llevando a la deforestación masiva de grandes áreas de bosques, lo que intensificó aún más la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. El resultado de este proceso ha sido un incremento sostenido de los niveles de CO₂, que ha contribuido de forma determinante al fenómeno del calentamiento global y a la aceleración del cambio climático. Este fenómeno no solo alteró el equilibrio ambiental, sino que también, estableció las bases de los desafíos climáticos que enfrentamos en la actualidad [5].

Para la captura y el secuestro de CO₂ el sistema terrestre dispone de una serie de procesos naturales los cuales son esenciales para regular y equilibrar las concentraciones de este gas en la atmósfera. Entre estos mecanismos destacan la fotosíntesis de las plantas, que absorbe y almacena carbono atmosférico, transformándolo en biomasa, y los océanos, que actúan como sumideros importantes al absorber grandes volúmenes de CO₂ del aire. Además de estos procesos, los suelos, los bosques y los ecosistemas terrestres también juegan un rol relevante en la mitigación del cambio climático, ya que contribuyen de manera significativa al almacenamiento de carbono a largo plazo [5].

Otra herramienta natural para la captura de carbono son las microalgas, organismos unicelulares fotosintéticos que generalmente se desarrollan en ambientes acuáticos [6]. Esta característica les ha permitido convertirse en una alternativa sostenible para capturar CO₂ y generar biomasa, la cual puede utilizarse en la producción de bioproductos [7]. Esto se



Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono y generar energía renovable

debe a que el carbono capturado permanece encerrado en la biomasa microalgal incluso después de la cosecha y el procesamiento, lo que la convierte en una solución eficaz a largo plazo para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. La capacidad de las microalgas para crecer rápidamente y generar grandes cantidades de biomasa y metabolitos en condiciones controladas amplía sus aplicaciones biotecnológicas en sectores como la alimentación, la farmacéutica, la cosmética y los biocombustibles. El cultivo de microalgas también aumenta la sostenibilidad ambiental a través del tratamiento de aguas residuales y el reciclaje de nutrientes [8]. El cultivo de microalgas se lleva a cabo en lugares conocidos como fotobiorreactores (abiertos o cerrados), donde estas especies pueden ser cultivadas y cosechadas de manera controlada, asegurando así, el logro de los resultados deseados [9].

Es así que, la captura de carbono emerge como una estrategia clave para mitigar los efectos de las emisiones de gases de efec-

to invernadero [8]. Ecuador dispone de una gran diversidad de microalgas, distribuidas a lo largo de todo su territorio [10]. Un ejemplo de ello es la *Chlorella sp.*, una especie que ha sido ampliamente estudiada a nivel mundial, evidenciándose su potencial para el desarrollo de tecnologías aplicables a la captura de carbono y la producción de biocombustibles. Sin embargo, a pesar de este conocimiento global, actualmente no se cuenta con un desarrollo tecnológico a nivel nacional para el aprovechamiento de estos microorganismos. Por esta razón, el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), con el apoyo financiero de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AE-CID), llevó a cabo el proyecto titulado “*Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal, Chlorella sp., utilizando fotobiorreactores*”, donde se realizó el diseño y la implementación de un fotobiorreactor prototipo para la masificación de microalgas mediante la captura de carbono de una planta termoeléctrica.

Concentración atmosférica global de dióxido de carbono 1990-2024

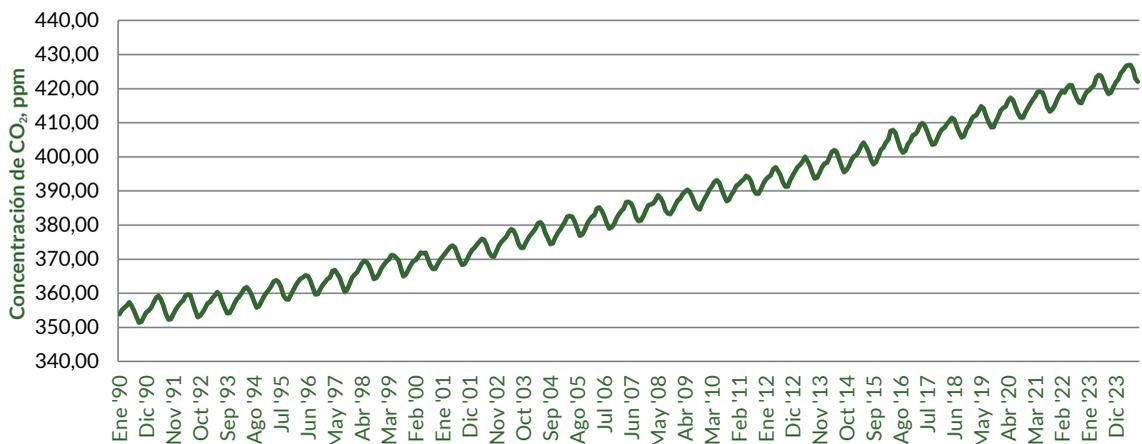


Figura 1: Concentración atmosférica global de dióxido de carbono 1990-2024.

Fuente: [4].



New Brunswick
an eppendorf company

Agit 40 RPM
40 RPM
OFF
Auto
Manual
Limits
Control Panel
1000 RPM
500 RPM

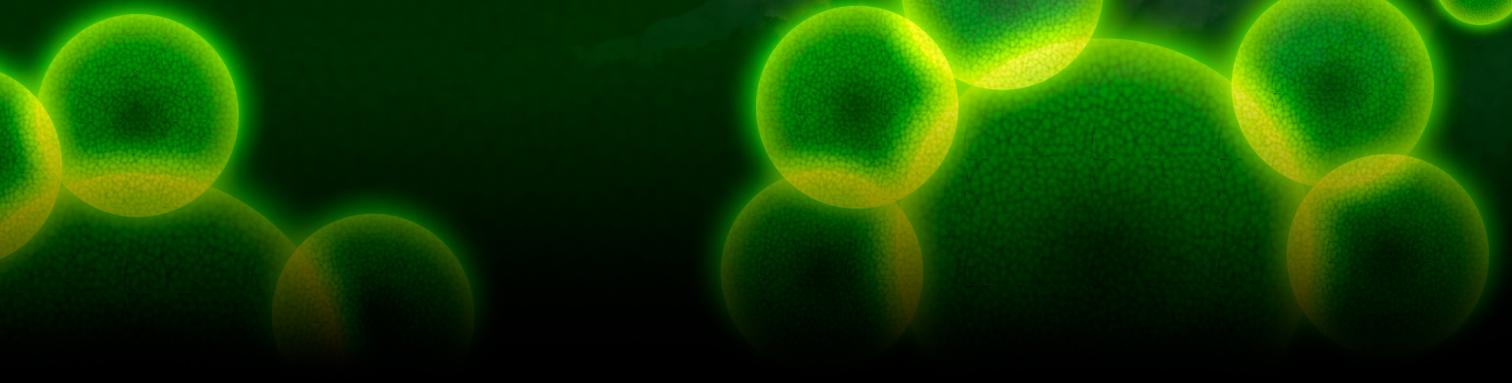
BioFlo/CelliGen 115
FERMENTOR/BIOREACTOR

GAS-1 GAS-2



Capítulo 1.

Microalgas, tecnología
y aplicaciones.



Capítulo 1.

MICROALGAS, TECNOLOGÍA Y APLICACIONES

1.1 Microalgas: características y ventajas

El término “alga” proviene del vocablo griego “*phykos*” (φῦκος), que significa alga, musgo o planta marina. En el ámbito de la biología, la ficología es la rama encargada del estudio de las algas en general. Cuando se hace referencia a su tamaño microscópico, los estudios se centran en las denominadas “microalgas”. Estas representan una amplia diversidad de organismos capaces de realizar fotosíntesis y que se caracterizan por contar con un organelo distintivo: los plastidios. Además, dentro del grupo de las microalgas se incluyen las cianobacterias, que son microorganismos que comparten similares características fisiológicas y ecológicas en su desarrollo.

Las microalgas han sido un modelo clave en el desarrollo de diversos campos científicos, como la microbiología, la biología, la biotecnología e incluso en tecnologías de biorefinación. A nivel global, estas microalgas son organismos que comparten con las plantas el

proceso de obtención de energía a través de la luz, mediante el cual capturan dióxido de carbono (CO_2) y liberan oxígeno. Se estima que aproximadamente el 50 % del oxígeno que se produce en el planeta proviene de las microalgas y las plantas acuáticas [11].

La biomasa de microalgas está compuesta por un rango de aproximadamente entre el 11 % y el 56 % de carbohidratos, entre el 40 % y el 70 % de proteínas, entre el 8 % y el 70 % de lípidos, y entre el 3 % y el 5 % de pigmentos. Esta composición varía según la especie y las condiciones de cultivo [12].

A nivel biológico, los plastidios desempeñan dos funciones fundamentales. La primera es actuar como un organelo encargado de la síntesis y el almacenamiento de compuestos químicos, como aminoácidos, aceites, carbohidratos y pigmentos. La segunda función es facilitar la fijación de dióxido de carbono (CO_2) para la formación de carbohidratos y otros compuestos de interés celular, en el proceso de fotosíntesis [11], como se observa en la Figura 2.

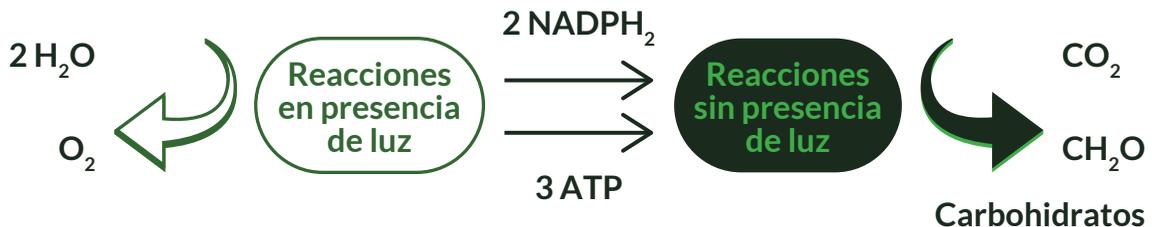


Figura 2: Fijación de CO_2 para formar carbohidratos y otros compuestos.

Fuente: [13].

En este sentido, la actividad fotosintética microalgal, permite captar la radiación emitida “energía lumínica” para transformarla en compuestos de interés celular, a través de reacciones de reducción y oxidación. La fotosíntesis comprende dos fases: fase luminosa y fase oscura. La primera “fase luminosa” transforma la energía lumínica a energía química, donde se obtiene moléculas de almacenamiento de energía NADPH₂, ATP y se libera oxígeno (O₂). En la segunda fase “fase oscura o Ciclo de Calvin”, estas moléculas son la base energética para poder reducir el CO₂ captado y transformarlo en carbohidratos [14].

Las microalgas se consideran una materia prima clave para la producción de biocombustibles de tercera generación debido a su alta eficiencia en la fotosíntesis y en la producción de compuestos de interés energético.

El cultivo de microalgas presenta las siguientes ventajas:

- **Cultivo en tierras poco productivas:** Los cultivos de microalgas no dependen de las condiciones tradicionales que requieren los cultivos bioenergéticos, como la calidad del suelo, la disponibilidad de fertilizantes o el agua de riego. Por lo tanto, las tierras poco productivas, que suelen necesitar insumos adicionales y presentan bajos rendimientos productivos, pueden convertirse en lugares adecuados para el cultivo de microalgas. De este modo, áreas inactivas, estériles, degradadas o subutilizadas pueden aprovecharse para el desarrollo de cultivos microalgales [15].
- **Fijación de carbono en la fotosíntesis:** En comparación con las plantas terrestres, las microalgas pueden absorber de 10 a 50 veces más energía solar, lo que les permite fijar directamente el dióxido de carbono del

ambiente. Por esta razón, son uno de los principales productores primarios de biomasa en la Tierra. Las microalgas son más eficientes en la fotosíntesis que las plantas por diversas razones. En primer lugar, todas sus células participan activamente en el proceso, mientras que en las plantas solo una fracción de la biomasa está involucrada. Además, las microalgas absorben nutrientes directamente de su entorno, lo que les permite evitar el consumo de energía que las plantas requieren para transportar nutrientes a través de las raíces y los tallos. Finalmente, debido a su ciclo de vida corto, las microalgas pueden ser cosechadas con mayor frecuencia, lo que aumenta su productividad en comparación con las plantas [16].

- **Mayor disponibilidad de dióxido de carbono:** Los cultivos de microalgas tienen un acceso más directo al dióxido de carbono, ya que este gas tiene una alta solubilidad en agua en comparación con otros gases, lo que hace que su concentración en la suspensión acuática sea superior a la del aire. Además, a diferencia de las plantas, las microalgas no dependen de los estomas para absorber el CO₂ [12].
- **Adaptación a las condiciones ecológicas:** A nivel comercial, las microalgas tienen la capacidad de desarrollarse en una amplia variedad de ambientes ecológicos, replicando las condiciones de su entorno natural. Pueden crecer en aguas no convencionales, como aguas residuales y salobres, y algunas especies son tolerantes a condiciones extremas de temperatura. Este aprovechamiento de los recursos del entorno natural convierte a las microalgas en una opción atractiva, ya que no comprometen los recursos hídricos destinados al consumo humano ni a la agricultura tradicional [15].

1.2 Fotobiorreactores: tipos y funcionamiento

La clasificación de los cultivos de microalgas se basa en varios factores, como la ubicación geográfica, los parámetros específicos de cultivo, el tipo de operación del reactor (continuo o por lotes) y el compuesto de interés que se produce [17]. En este contexto, los sistemas de cultivo se clasifican en dos categorías principales: sistemas abiertos y sistemas cerrados.

Los sistemas abiertos se utilizan comúnmente a escala comercial debido a su bajo costo de inversión y operación (Figura 3). Estos sistemas suelen tener la forma de estanques circulares o de tipo *raceway* (carriles de circuito cerrado). El diseño de los estanques *raceway* fue adaptado de los sistemas de tratamiento de aguas residuales empleados en la década de 1950. Desde los años 80, los estanques *raceway* han sido utilizados para el cultivo de microalgas a gran escala.

El diseño de estos estanques consiste en un sistema de paredes rígidas con un fondo plano y una profundidad que varía entre 0,25 y 0,30 metros. Los extremos de los *raceways* son curvados y están equipados con paletas giratorias que permiten mover el medio de cultivo a lo largo de los carriles, asegurando que las microalgas estén expuestas a la luz solar. Debido a esto, se prefieren los estanques de baja profundidad, ya que favorecen una mejor penetración de la luz.

Los materiales empleados en la construcción de los *raceways* pueden ser de concreto o plásticos resistentes a la luz ultravioleta. Es crucial que estos materiales estén libres de productos químicos que puedan inhibir el crecimiento de las microalgas o contaminar el cultivo. El diseño de los estanques debe tener en cuenta parámetros clave, como la mezcla del cultivo, el sistema de alimentación, el sistema de cosecha, el suministro de dióxido de carbono y los sistemas de limpieza [16].

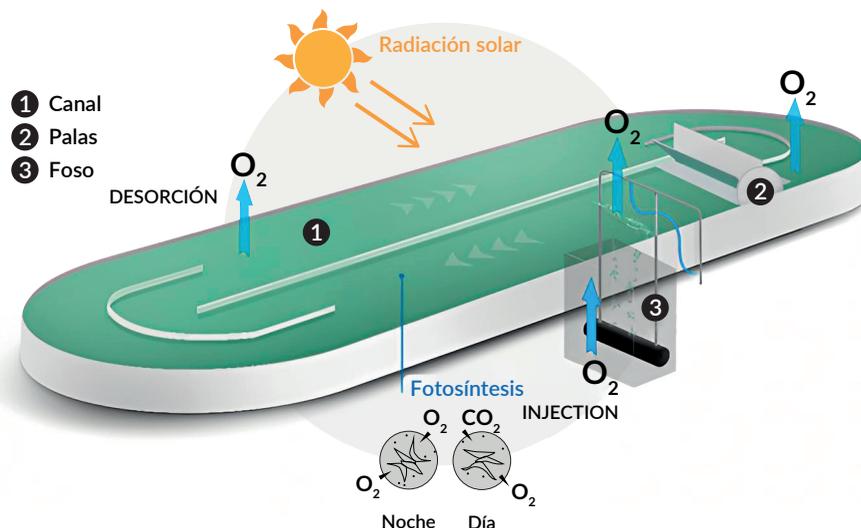


Figura 3: Fotobiorreactor abierto tipo estanque (*raceway*).
Fuente: [18].

Los sistemas cerrados son tecnologías de alta productividad de biomasa y baja contaminación, utilizadas principalmente para la obtención de compuestos de alto valor comercial (Figura 4). Entre estos compuestos se incluyen ácidos grasos poliinsaturados, polisacáridos, antioxidantes y alimentos para acuicultura, entre otros. Estos sistemas ofrecen un control más preciso de los parámetros operativos del cultivo, lo que facilita la modificación de la composición bioquímica de las microalgas según el compuesto de interés [11]. El diseño de los fotobiorreactores varía según la forma del reactor, que puede ser en columnas verticales, tubulares o paneles planos.

Los reactores tubulares constan de dos componentes principales: la columna de desoxigenación y una red de tubos dispuestos

horizontalmente. En la columna de desoxigenación, se ingresa aire o una mezcla de gases, como dióxido de carbono, generando burbujas y, al mismo tiempo, controlando la temperatura del cultivo que circula a través de los tubos. Este sistema también facilita la eliminación del oxígeno acumulado en los tubos, producto de la actividad fotosintética, favoreciendo así el intercambio de gases y evitando que las células de biomasa microalgal se asienten. Tras la mezcla de gases, el medio de cultivo es impulsado nuevamente hacia la red de tubos, lo que permite que el ciclo de fotosíntesis continúe en los tubos y que la eliminación de gases se mantenga en la columna de agitación.

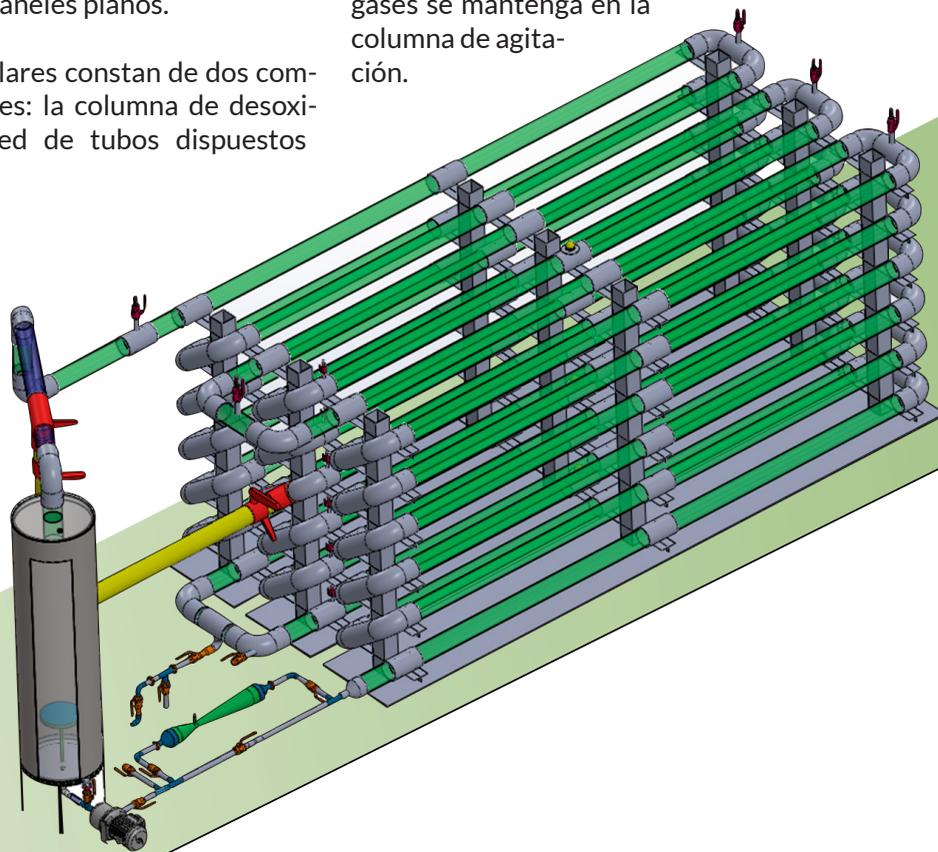


Figura 4: Fotobiorreactor cerrado tipo tubular.

Fuente: IIGE, 2024.

Los fotobiorreactores están diseñados para optimizar la recolección de radiación solar, minimizar la resistencia del fluido y controlar parámetros clave, como los gradientes de pH y las concentraciones de gases (O_2 y CO_2) generados a lo largo de la red de tubos [11].

Tabla 1: Comparación de los diferentes tipos de sistemas de cultivo de microalgas.

	Sistemas abiertos	Sistemas cerrados
Riesgo de contaminación	Alta	Bajo
Pérdidas de CO_2	Alta	Baja
Pérdidas por evaporación	Alta	Baja
Eficiencia en el uso de luz	Mala	Excelente
Relación Área/ Volumen	Bajo	Alta
Área requerida	Alta	Baja
Control del proceso	Difícil	Fácil
Productividad de biomasa	Baja	Alta
Costo de inversión	Bajo	Alto
Costos de operación	Bajo	Alto
Costos de cosecha	Alto	Relativamente baja
Escalado	Fácil	Difícil

Fuente: [19].

1.3 Captura de carbono : conceptos y tecnologías

En el metabolismo de las microalgas, el carbono, junto con el nitrógeno y el fósforo, son nutrientes esenciales para su crecimiento celular. Estas microalgas desempeñan un papel crucial en el medio ambiente al fijar biológicamente el carbono atmosférico, así como el proveniente de gases de escape de la industria y plantas de generación de energía (centrales eléctricas). El carbono fijado se convierte en biomasa celular, compuesta principalmente por carbohidratos, proteínas y lípidos. Estas moléculas mediante ciertos procesos de laboratorio e industriales

pueden transformarse en productos bioquímicos, biocombustibles como biodiesel, biohidrógeno, biometano o bioetanol, y compuestos bioactivos de interés comercial.

En este contexto, el dióxido de carbono es fundamental para los procesos de fotosíntesis, ya que se requieren 1,8 g de CO_2 para producir 1 g de biomasa microalgal. La fijación del carbono comienza en la primera fase de la fotosíntesis, en la cual la energía lumínica se transforma en energía química, almacenada en las moléculas de $NADPH_2$ y ATP. Durante este proceso, se capta dióxido de carbono y se libera oxígeno.

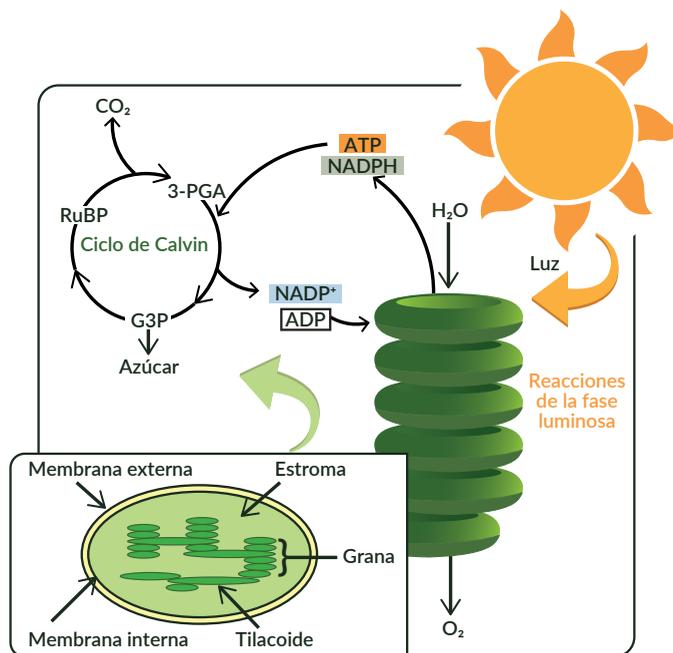


Figura 5: Esquema de transformación de la luz solar en energía química.
Fuente: [20].

La segunda etapa de la fotosíntesis, también conocida como ciclo de Calvin (Figura 6), utiliza el carbono inorgánico captado del ambiente como precursor en la formación de carbohidratos. Este proceso requiere la energía almacenada en las moléculas de ATP y NADH, provenientes de la fase lumínica, y se lleva a cabo mediante una serie de reacciones metabólicas. La enzima clave en este proceso es la ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa, o RuBisCO, que facilita la incorporación del CO₂ a una molécula orgánica, generalmente glucosa (C₆H₁₂O₆). Las reacciones dependientes de la luz ocurren en la membrana tilacoide, mientras que las reacciones del ciclo de Calvin se desarrollan en el estroma, el espacio interior de los cloroplastos.

Este proceso consta de una serie de reacciones consecutivas: fijación de carbono, reducción y

regeneración. Para generar dos moléculas de gliceraldehído-3-fosfato (G3P) y formar una molécula de glucosa, se requieren seis ciclos de Calvin (o seis moléculas de CO₂), 18 moléculas de ATP y 12 moléculas de NADPH. El gliceraldehído-3-fosfato (G3P) resultante es la molécula base para la síntesis de carbohidratos.

En la síntesis de lípidos en las microalgas, el principal precursor es el acetil-CoA, que se obtiene mediante una serie de pasos metabólicos a partir del gliceraldehído-3-fosfato (G3P) y el piruvato. Este proceso se divide en dos etapas: la síntesis de ácidos grasos y el ensamblaje de acil-lípidos. Una vez sintetizado el ácido graso, este se libera y se dirige al cloroplasto (para los ácidos grasos C₁₆ y C₁₈; Sn⁻²) o al retículo endoplásmico (para los ácidos grasos C₁₆ y C₁₈; Sn⁻¹), donde se completan los procesos de elongación y desaturación de los ácidos grasos [19].

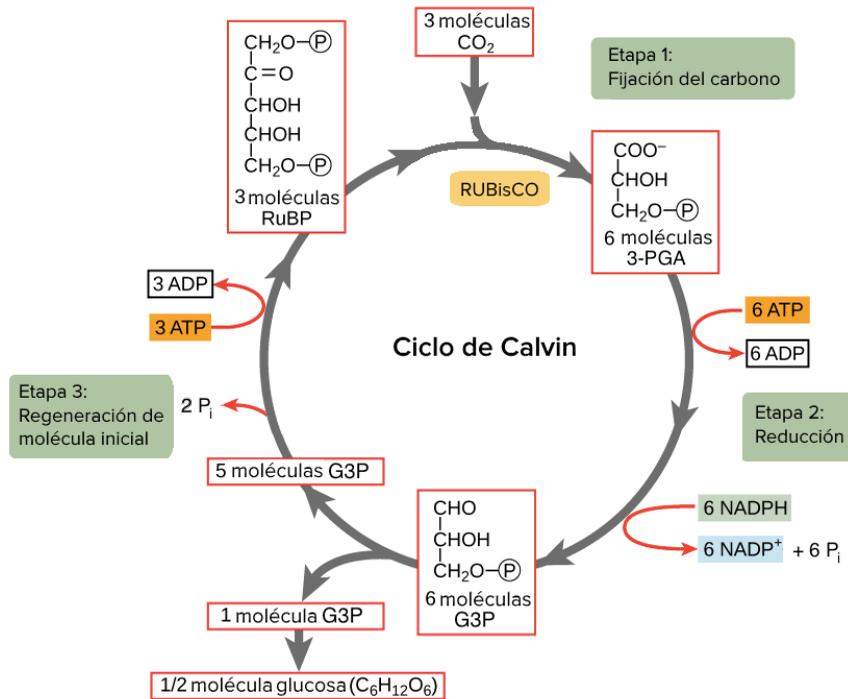


Figura 6: Ciclo de Calvin.

Fuente: [20].

1.4 Biocombustibles: definición y tipos

De manera general la palabra biocombustible se refiere a los combustibles en estado líquido, gaseoso y sólido obtenidos a partir de biomasa. Estos han surgido como resultado de diversas estrategias políticas, económicas y sociales, en defensa de la seguridad energética, la seguridad alimentaria, las preocupaciones medioambientales y otros aspectos de interés socioeconómico. Los biocombustibles cumplen con los siguientes principios: a) son recursos biodegradables, b) contribuyen a la sostenibilidad al reducir la dependencia de los combustibles

fósiles, c) representan una fuente de energía neutra en carbono, y d) son recursos confiables y disponibles localmente [21].

Una diferencia fundamental entre los combustibles fósiles y los biocombustibles radica en el contenido de oxígeno. Los biocombustibles contienen entre un 10 % y un 45 % de oxígeno, mientras que el petróleo no presenta este elemento, lo que provoca una diferencia en las propiedades químicas de ambos tipos de combustibles. Además, los biocombustibles tienen niveles muy bajos de azufre, y muchos de ellos también presentan concentraciones reducidas de nitrógeno.

Actualmente, la biomasa microalgal ha ganado gran relevancia científica como fuente para la producción de biocombustibles. Para obtener recursos energéticos a partir de esta biomasa, existen diversas rutas de conversión, que incluyen procesos termoquímicos, bioquímicos y reacciones químicas (Figura 7). Los procesos termoquímicos se basan en la degradación térmica de la biomasa para generar diferentes tipos de combustibles, me-

diante técnicas como la combustión directa, la licuefacción, la gasificación y la pirólisis. Por su parte, la conversión bioquímica se realiza a través de microorganismos que transforman la biomasa en productos energéticos, utilizando procesos como la digestión anaeróbica, la fermentación alcohólica y la biofotólisis. Además, existen reacciones químicas clave, como la transesterificación, que permiten obtener biocombustibles como el biodiésel [22].

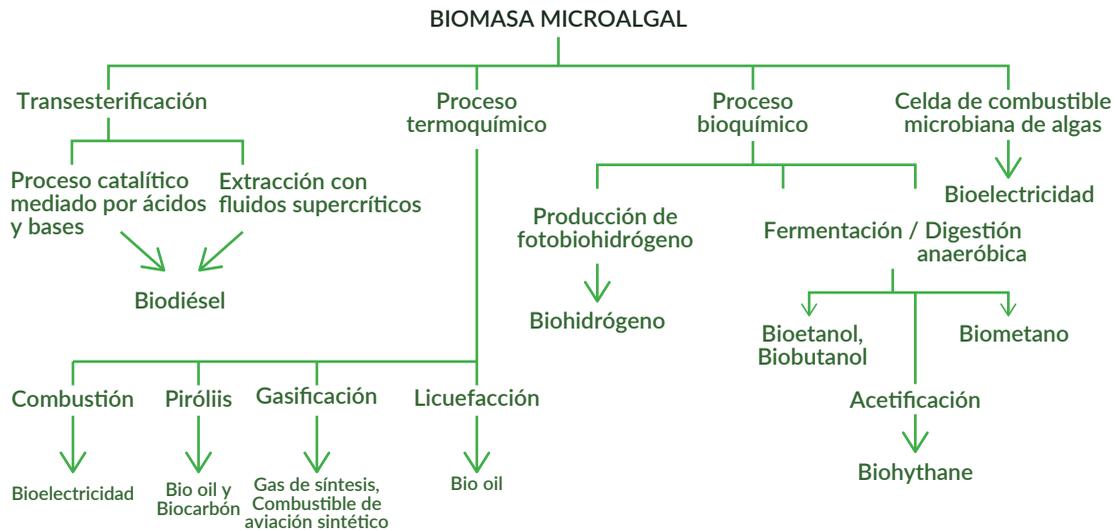


Figura 7: Esquema de las rutas de conversión de la biomasa microalgal a energía.

Fuente: [23].

Dentro de los biocombustibles más estudiados y con un alto potencial energético, se encuentran varios tipos que pueden ser producidos a partir de microalgas, entre ellos: biodiésel, bioetanol, biometano y biohidrógeno [24]. Cada uno de estos biocombustibles presenta características y ventajas específicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones y usos en el sector energético.

1.4.1 Biodiésel

Los lípidos son componentes esenciales en la producción de biodiésel, y la biomasa de microalgas tiene la capacidad de almacenar grandes cantidades de estos, incluso en condiciones de limitación de nutrientes. Los ácidos grasos presentes en las microalgas se clasifican según su grado de saturación: ácidos grasos saturados

(SFAs), ácidos grasos monoinsaturados (MU-FAs) y ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs). El biodiésel derivado de microalgas se presenta como una fuente prometedora para la industria aeronáutica debido a su bajo punto de congelación y su alta densidad energética. En aplicaciones de motores, el biodiésel puede utilizarse directamente; sin embargo, debido a su alta susceptibilidad a la oxidación, los estudios se centran en mejorar su estabilidad y viabilidad como combustible renovable [25].

Para la producción de biodiésel, se han desarrollado dos tecnologías principales: transesterificación y transformaciones termopresión (en condiciones supercríticas). La reacción de transesterificación permite convertir los ácidos grasos (lípidos y triglicéridos) en ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés), utilizando metanol y un catalizador ácido o básico. Este proceso produce biodiésel como una mezcla de ésteres de ácidos grasos insaturados [26].

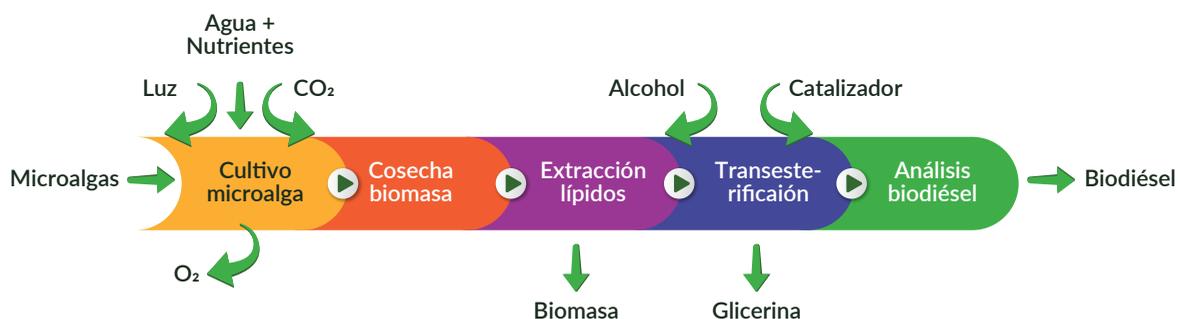


Figura 8: Esquema de producción de biodiésel por transesterificación de aceite de microalga. Fuente: [27].

El proceso de tratamiento por termopresión es un procedimiento térmico que no requiere la extracción del aceite. En este método, se emplea un catalizador en presencia de hidrógeno para convertir la materia orgánica de las microalgas en moléculas de cadena corta, lo que permite la obtención de biodiésel [28].

1.4.2 Bioetanol

Los carbohidratos, especialmente los polisacáridos, son componentes clave en la producción de bioetanol. Las especies con mayor contenido de azúcares incluyen las cianobacterias (ricas en glucógeno) y las algas verdes (que contienen almidón y celulosa). Estas

especies son las más investigadas como materia prima para la obtención de bioetanol, representando entre el 20 % y el 40 % de su composición celular. La bioconversión a etanol se lleva a cabo en dos etapas: sacarificación y fermentación. La sacarificación es una reacción enzimática que descompone los polisacáridos en azúcares fermentables, los cuales, posteriormente, son convertidos en bioetanol mediante microorganismos, principalmente levaduras. El proceso de fermentación alcanza un rendimiento superior cuando se emplean levaduras marinas. El bioetanol se utiliza como aditivo en la gasolina para mejorar su octanaje y optimizar el rendimiento del motor [23].

1.4.3 Biohidrógeno

Dentro de la diversidad de microalgas, las cianobacterias y algas verdes poseen un metabolismo celular aeróbico facultativo, lo que les permite la producción de hidrógeno a través de biofotólisis. Este proceso biológico aprovecha la energía solar para generar hidrógeno a partir del agua. Durante la fotosíntesis, las microalgas utilizan la luz como fuente de energía, lo que provoca la descomposición de la molécula de agua (H_2O) en oxígeno (O_2) y protones (H^+). Como resultado, se libera hidrógeno gaseoso (H_2) como subproducto. La reacción es catalizada por la enzima hidrogenasa [29].

1.4.4 Biometano

El biometano se produce mediante la digestión anaeróbica, un proceso biológico que convierte la materia orgánica en metano, dióxido de carbono y biomasa bacteriana. Este proceso aprovecha de manera eficiente el contenido de carbono y el alto porcentaje de agua presentes en los materiales. Tanto las microalgas como los residuos generados en la producción de biodiésel y bioetanol pueden ser sometidos a digestión anaeróbica para obtener biogás. Los estudios actuales se enfocan en mejorar la digestibilidad de las paredes celulares, ya que esta característica influye de manera significativa en la calidad y el rendimiento de la biomasa durante el proceso [23].

1.4.5 Metano enriquecido (Hythane)

En los últimos años, el concepto de la revalorización de residuos ha experimentado un rápido crecimiento. La biomasa residual es considerada como un recurso valioso, no solo un desecho. El aumento del interés tanto científico como comercial ha impulsado el desarrollo de conceptos de biorrefinación viables, que

permiten convertir los residuos de celulosa en biocombustibles, productos químicos y productos industriales, debido a las preocupaciones medioambientales, el agotamiento de los recursos fósiles y una mayor conciencia pública. Además, también se ha observado una tendencia creciente hacia un uso más eficiente de los residuos agroindustriales, de aguas residuales y de celulosa para su conversión en hidrógeno (H_2) y metano (CH_4).

El uso de desechos orgánicos para generar CH_4 es una tecnología madura y comercializada. No obstante, la producción de hidrógeno biológico a partir de biomasa residual es un enfoque novedoso y prometedor para satisfacer la creciente demanda de energía verde. El H_2 es un portador de energía eficaz en comparación con la gasolina o el gas natural, ya que la energía liberada por unidad de masa es, al menos, el doble que la de los combustibles convencionales. Sin embargo, la densidad del H_2 es más baja (0,08988 g/l a 0 °C y 101,325 kPa) que la de otros combustibles fósiles, lo que resalta la necesidad de un almacenamiento eficiente.

El H_2 es un combustible ideal, ya que solo libera agua durante la combustión y puede convertirse en electricidad mediante celdas de combustible o usarse directamente en motores de combustión interna. Dentro de las diversas materias primas disponibles para la producción de H_2 , la biomasa de alga presenta considerable atención debido a su alto contenido de carbohidratos [30].

Existen rutas termoquímicas y bioquímicas para la valorización energética de la biomasa residual. No obstante, las rutas bioquímicas suelen ser preferidas frente a las termoquímicas debido a su mayor simplicidad, así como a su menor consumo energético y la generación reducida de emisiones perjudiciales. Por

esta razón, los procesos acidogénicos, como la fermentación oscura, la digestión anaeróbica y los procesos combinados de ambos, emergen como alternativas atractivas para la producción de biocombustibles renovables (H_2 y CH_4). La fermentación oscura genera una mezcla de H_2 y CO_2 , comúnmente conocida como biohidrógeno (bio- H_2), mientras que la digestión anaeróbica produce una mezcla de CH_4 y CO_2 , generalmente conocida como biogás [31].

El metano enriquecido o llamado *hythane* [30], es un combustible híbrido compuesto por una mezcla de hidrógeno en un rango de 8 % a 30 % en volumen, siendo el resto de la mezcla metano. Fue desarrollado por *Hydrogen Component Inc.* y patentado a principios de la década de 1990 [32]. La primera aplicación de *hythane* fue aumentar la autonomía de los vehículos que utilizan hidrógeno como combustible, mediante la incorporación de gas natural comprimido (GNC) [32].

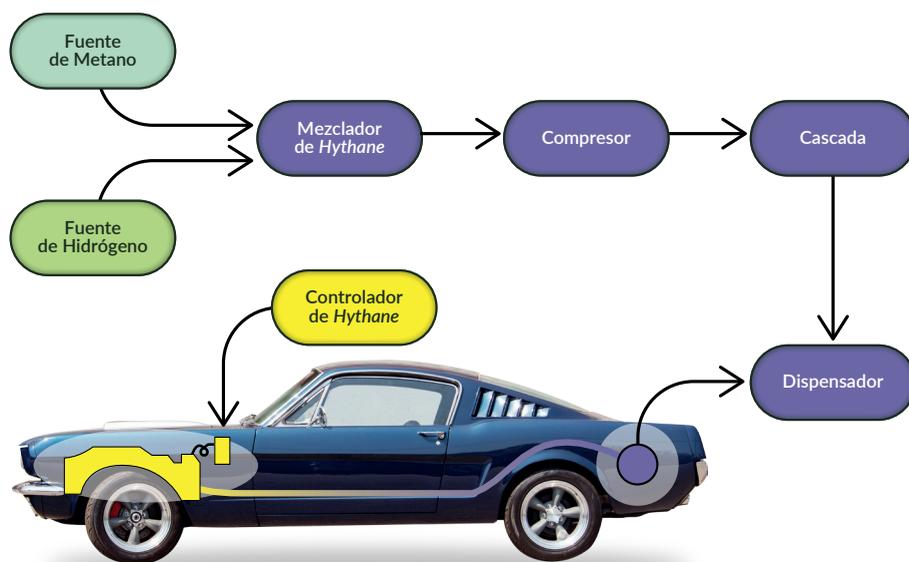


Figura 9: Ilustración del uso de *hythane* en un vehículo.

Fuente: [32].

La combustión del *hythane* es amigable con el medio ambiente, ya que emite casi un 45 % menos de gases NO_x que el GNC. Diversos investigadores han observado que la combinación de H_2 y CH_4 , con una proporción de aproximadamente 10 % - 25 % de H_2 y 75 % - 90 % de CH_4 , mejora la rentabilidad y la eficiencia de los procesos involucrados, al lograr una mayor recuperación de energía (entre un 10 % - 40 %). Por lo tanto, el *hythane* puede ser un combustible vehicular adecuado, aprovechando los beneficios combinados del H_2

y el CH_4 , como la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre (NO_x y SO_x), el aumento de la inflamabilidad, la disminución del tiempo de combustión y la mejora de la eficiencia térmica. El *biohythane*, una mezcla que incluye bio- H_2 , bio- CH_4 y CO_2 , puede generarse mediante la integración de los procesos de fermentación oscura y digestión anaerobia, lo que resulta en menores costos de producción, una menor huella de carbono y una mayor sostenibilidad ambiental [31].



Capítulo 2.

Metodología para estudios
de captura de carbono.



Capítulo 2.

METODOLOGÍA PARA ESTUDIOS DE CAPTURA DE CARBONO

2.1 Selección de la microalga

Existen algunas especies de microalgas que pueden desarrollarse de manera eficiente bajo el ciclo natural de día y noche, lo que les permite ser utilizadas en sistemas de cultivo al aire libre a gran escala. Además, hay cepas que pueden aprovechar directamente el CO_2 de los gases de combustión para producir biomasa microalgal, conocidas como agentes de biofijación de CO_2 . De forma similar, ciertas especies requieren compuestos de azufre y nitrógeno (SO_x y NO_x) para su crecimiento, ya que estos actúan como fuente de nutrientes para ellas [33]. Las microalgas presentan diferentes respuestas ante altas concentraciones de oxígeno y niveles elevados de intensidad lumínica. En general, la inhibición del proceso de fotosíntesis (fijación de CO_2 y crecimiento celular) se incrementa tanto con la concentración de oxígeno como con la intensidad de la luz, principalmente a niveles superiores a la saturación.

La selección de las mejores cepas para la fijación de dióxido de carbono tiene un impacto considerable en la competitividad de costos y la eficiencia del proceso. Para alcanzar altas tasas de fijación de CO_2 se requieren varias características como una elevada tasa de crecimiento celular, eficiencia en el uso de CO_2 , tolerancia a los componentes de los gases de combustión, capacidad para producir bioproductos, facilidad de cosecha, resistencia a altas temperaturas del medio líquido y

a altas concentraciones de CO_2 . El empleo de especies que son capaces de soportar altas concentraciones de CO_2 , presencia de contaminantes en los gases de combustión y temperaturas elevadas puede contribuir a reducir los costos del tratamiento previo a la inyección al fotobiorreactor. Una estrategia para seleccionar cepas más resistentes a las condiciones adversas de los cultivos expuestos a gases de combustión consiste en aislar especies nativas de áreas cercanas a fuentes de emisión, como las centrales térmicas [34].

La elección de *Chlorella sp.* (Figura 10), para un estudio de captura de CO_2 se fundamenta en diversas propiedades biológicas y fisiológicas que la convierten en una opción adecuada para su implementación en sistemas industriales de captura de carbono, particularmente en aplicaciones con gases de combustión de plantas termoeléctricas.

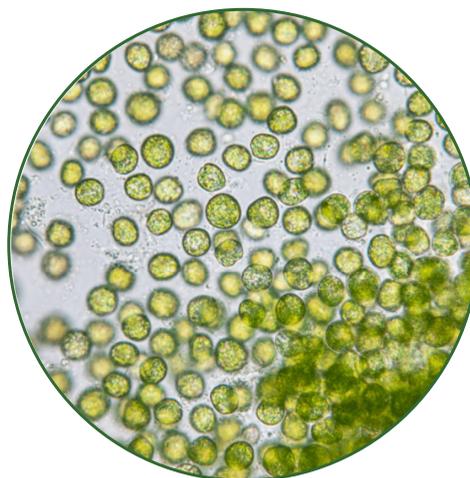


Figura 10: *Chlorella sp.*
Fuente: [35].

Diversos estudios a nivel mundial han confirmado que este género de microalgas se destaca por su alta eficiencia en la captura de dióxido de carbono mediante la fotosíntesis, lo cual es crucial en entornos donde el CO₂, proveniente de la combustión de combustibles fósiles, constituye la principal fuente de emisiones [36]. La habilidad de la *Chlorella sp.*, para tolerar altas cantidades de CO₂ es crucial para el desarrollo de un sistema de captura eficiente, capaz de generar un impacto notable en la disminución de las emisiones contaminantes.

Una de las principales ventajas de la *Chlorella sp.*, es su rápido ritmo de crecimiento, lo que facilita un aprovechamiento más eficiente del CO₂ disponible. Este crecimiento acelerado, combinado con su elevada productividad celular, optimiza los beneficios del sistema de captura al incrementar la cantidad de carbono fijado en un tiempo reducido [37].

Además, esta microalga se caracteriza por su capacidad para adaptarse a condiciones ambientales cambiantes, lo que la convierte en una opción ideal para sistemas de captura de carbono en entornos industriales. Las plantas termoeléctricas emiten gases a altas temperaturas y con concentraciones elevadas de CO₂, lo que representa un desafío para muchas especies de microalgas. No obstante, esta especie ha demostrado ser resistente a las fluctuaciones en la concentración de dióxido de carbono y a los cambios térmicos [38], brindándole una ventaja considerable frente a otras especies que pueden ser más vulnerables a estas variaciones [37]. La *Chlorella* tiene la capacidad de crecer en una amplia gama de pH y salinidad, lo que permite su cultivo en

condiciones de alta variabilidad, propias de los sistemas industriales de captura de gases [39].

Otra ventaja clave es la facilidad con la que se cultiva. A diferencia de otras especies de microalgas que requieren condiciones específicas de nutrientes o iluminación, la *Chlorella sp.*, puede desarrollarse en condiciones relativamente sencillas, utilizando medios nutritivos básicos y fuentes de luz estándar [40]. Además, la biomasa generada por *Chlorella sp.*, es rica en proteínas, ácidos grasos esenciales, vitaminas y minerales, lo que la convierte en un recurso valioso para diversas industrias [36]. También puede emplearse en la producción de biocombustibles o como materia prima para la generación de biogás. Esta versatilidad en el uso de la biomasa no solo contribuye a la mitigación del cambio climático mediante la captura de CO₂, sino que también permite la obtención de productos de valor añadido con aplicaciones en el sector energético [41].

Por otro lado, a pesar de que existen otras microalgas que también tienen capacidades de captura de carbono, como *Spirulina* [42], *Scenedesmus* [43], o *Nannochloropsis* [44], ninguna de ellas presenta la combinación ideal de características que ofrece la *Chlorella*. Por ejemplo, la *Spirulina* (Figura 11) se caracteriza por su capacidad para tolerar condiciones severas, aunque su tasa de crecimiento es más lenta y su eficiencia en la fijación de CO₂ es inferior a la de la *Chlorella*. De manera similar, *Scenedesmus* (Figura 12) y *Nannochloropsis* (Figura 13) son eficaces en la captura de carbono, pero requieren condiciones de cultivo más estrictas, lo que puede dificultar su implementación a gran escala en entornos industriales [45].

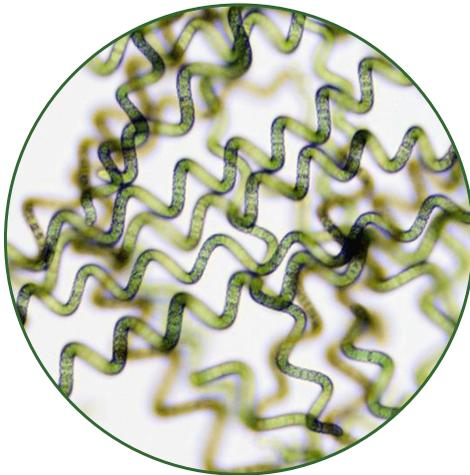


Figura 11: *Spirulina*.
Fuente: [46].

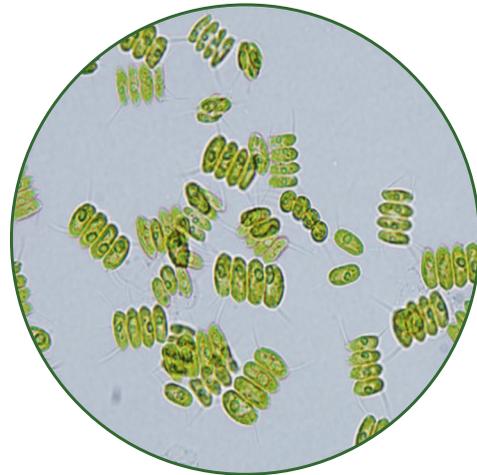


Figura 12: *Scenedesmus*.
Fuente: [47].

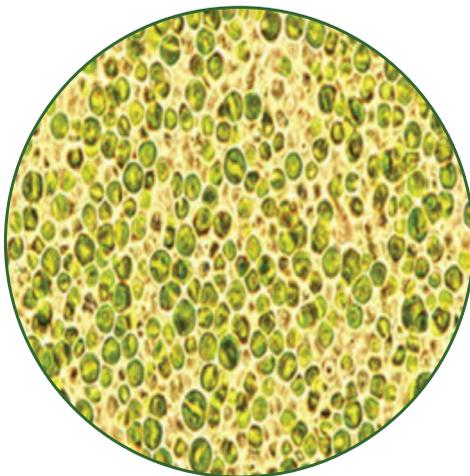


Figura 13: *Nannochloropsis*.
Fuente: [48].

2.2 Condiciones óptimas de operación

El crecimiento microalgal está determinado por diferentes factores físicos, químicos y biológicos como la temperatura, el pH, la incidencia de luz, fuentes de carbono, concentración de los nutrientes en el medio de cultivo, velocidad de aireación, entre otros. En conjunto estos son los parámetros que definen el crecimiento microalgal y determinan las condiciones de operación para la conversión fotosintética de CO_2 [49]. Para optimizar el proceso de crecimiento microalgal se requiere realizar pruebas que evalúen el efecto o la incidencia de cada parámetro en el proceso con la finalidad de determinar las condiciones óptimas de operación.

- Efecto de la temperatura

La temperatura es una propiedad física de la materia que influye directamente en la energía interna de un cuerpo, en el caso de las microalgas, la temperatura incide en la actividad enzimática de las células generando un incremento en su actividad, lo cual conlleva a un aceleramiento en el proceso de división celular y consecuentemente, mayor producción de biomasa. En resumen, la temperatura afecta la actividad fotosintética de las algas y la productividad de la biomasa [50].

Estudios realizados han determinado que existe una ecuación mediante la cual se puede

establecer una relación entre la temperatura y la tasa de crecimiento conocida como la ecuación de Arrhenius. Esta ecuación determina que, por cada 10°C de aumento en la temperatura, el crecimiento celular se duplica hasta alcanzar la temperatura óptima, y, a partir de ese momento existe un decrecimiento celular [51]. El decrecimiento celular ocurre cuando células son sometidas a temperaturas mayores a las óptimas, se genera una desnaturalización de las proteínas e inactivación enzimática, lo cual implica que ya no existe división celular y consecuentemente existe una inhibición de crecimiento. La máxima tasa de crecimiento celular en función de la temperatura está descrita por la ecuación de Arrhenius.

$$\mu = A' e^{-\left(\frac{E_1}{RT}\right)}$$

Ecuación 1

Donde:

μ , [a]	Constante cinética (dependiente de la temperatura)
A' , [a]	Factor de frecuencia (indica la frecuencia de las colisiones)
E_1 , J mol ⁻¹	Energía de activación de la reacción limitante del crecimiento
R , J mol ⁻¹ K ⁻¹	Constante universal de gases
T , K	Temperatura absoluta

Es importante mencionar, que las condiciones óptimas de temperatura se definen en función de la cepa de microalga a ser utilizada. Un estudio realizado por Adenan et al. (2013), reportó que, en un rango de temperaturas experimentado, el mejor crecimiento celular para una cepa de *Chlorella sp.* se obtuvo a una temperatura de 25°C [52]. Otro estudio menciona que los resultados obtenidos en la determinación de la temperatura óptima de crecimiento para la cepa *Chlorella vulgaris* fue entre 25°C y

30°C [53]. Pachiappan et al. (2015), menciona que los rangos de temperatura que son perjudiciales para el crecimiento microalgal son a temperaturas menores a 16 °C y mayores a 35°C [54]. En síntesis, la temperatura incide de manera directa en el crecimiento celular, es decir, al aumentar la temperatura se genera un incremento en el crecimiento celular de las microalgas. Cuando se ha llegado a la temperatura óptima, cualquier incremento de temperatura genera un decrecimiento celular [55].

- **Efecto del pH**

El pH es un parámetro que influye en el crecimiento microalgal porque puede controlar el metabolismo de las microalgas y la formación de biomasa. La mayoría de las especies microalgales presentan tasas de crecimiento a pH neutros, sin embargo, existe un rango de pH óptimo de crecimiento para cada una de las especies microalgales [51].

Para determinar el valor óptimo de pH, es fundamental tener en cuenta varios factores. Primero, se debe considerar el pH del medio de cultivo. También es importante medir el pH del medio después de ser autoclavado, ya que este proceso implica un aumento de temperatura y presión, lo que provoca desgasificación y puede alterar la medición del mismo. Además, es necesario evaluar el pH tras la inyección de CO₂ en el medio de cultivo, ya que la disolución de CO₂ en agua provoca una disminución del pH debido a la formación de bicarbonato (HCO₃⁻) [56].

Durante la etapa de inoculación, se observa un aumento en los valores de pH. Esto se debe a que, en condiciones de pH óptimo, el bicarbonato presente en el medio se transforma en dióxido de carbono gracias a la acción de la enzima algal anhidrasa carbónica, lo que provoca la liberación de iones hidroxilos. Existe una relación compleja entre la concentración de CO₂ y el pH, principalmente debido a las especies en equilibrio que se encuentran en el medio de cultivo. No obstante, a mayores concentraciones de CO₂ se produce una mayor cantidad de biomasa [57][58].

El proceso de fotosíntesis en la mayoría de las

microalgas ocurre en un rango óptimo de pH de 6 a 10. Es relevante destacar que, en este rango, los bicarbonatos son la especie en equilibrio dominante [59]. En resumen, hay dos factores principales que influyen en el pH: el porcentaje de CO₂ introducido en el sistema y la cantidad de biomasa producida. Cuando se introducen altas concentraciones de CO₂ en el sistema, pero la producción de biomasa es baja, se obtienen valores de pH reducidos [60].

- **Efecto de la incidencia de luz**

La luz es uno de los factores más importantes que influye en el proceso de fotosíntesis, mediante el cual se convierte el dióxido de carbono en componentes orgánicos como carbohidratos, lípidos y proteínas. La energía luminosa se compone de dos aspectos: la intensidad y la longitud de onda de la luz. Además, la luz es un elemento clave que favorece el crecimiento celular, ya que la fotosíntesis se realiza en su presencia. El mecanismo fotosintético en las algas implica la absorción de la energía luminosa, que se almacena en forma de trifosfato de adenosina (ATP) y nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADPH), los cuales son utilizados para la producción de biomasa [50].

La luz influye en el crecimiento de las microalgas bajo tres condiciones lumínicas: limitación, saturación e inhibición. En condiciones de limitación de luz, un aumento en la intensidad lumínica favorece el crecimiento microalgal. Sin embargo, en situaciones de saturación, la actividad fotosintética disminuye debido a la inhibición del proceso de fotosíntesis. Por último, cuando la intensidad de la luz aumenta de manera significativa, se entra en la fase de inhibición, lo que puede causar daños irreversibles

Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable

en la fotosíntesis, conocido como fotoinhibición. Es importante destacar que los períodos de exposición a la luz también tienen un impacto en el crecimiento de las microalgas [56].

Al exponer un cultivo de microalgas a la luz por períodos de tiempo definidos estos han incrementado el crecimiento celular en comparación con una exposición continua de luz. Este fenómeno se explica ya que el proceso de división celular para organismos unicelulares fotosintéticos ocurre bajo condiciones de oscuridad, mientras que, para otros organismos la división celular sucede tanto en períodos de luz y oscuridad. Es importante mencionar, que la solar es una fuente de luz natural que provee de este recurso al cultivo para la fotosíntesis, sin embargo, cuando se excede la cantidad óptima se genera una fase de estrés oxidativo y consecuentemente la fotoinhibición que reduce la eficiencia fotosintética [50].

Generalmente, las microalgas utilizan la luz en longitudes de ondas comprendidas entre los 400 nm y 700 nm para el proceso de la fotosíntesis; y, la misma depende de la especie de microalga. Estudios reportan que existe un crecimiento celular en diferentes longitudes de onda y tipos de luz como la roja (600 nm a 700 nm) y la azul (400 nm a 500 nm) que estimulan el crecimiento; mientras que, para el contenido de lípidos varían en función de la intensidad de la luz [61].

Por otra parte, al usar luces LED (roja, blanca natural, luz cálida, y azul) a diferentes intensidades en la producción de biomasa de *Chlorella vulgaris*, la luz blanca cálida con 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ es la óptima para mejorar la productividad de la biomasa y la tasa fotosintética [15].



Figura 14: Ensayos de optimización, parámetro de estudio: Intensidad de luz, ejecutados en el proyecto “Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal, *Chlorella Sp*, empleando fotobiorreactores” financiado por la AECID.

• Efecto del tipo de fuente de carbono

En función del tipo de cultivo se puede usar una o varias fuentes de carbono. Para el caso de los cultivos autotróficos se usa CO_2 o compuestos de bicarbonatos, mientras que, los cultivos heterótrofos usan materiales orgánicos como la glucosa, el almidón, sucrosa, acetato de sodio, glicerol, etc., los cuales son la fuente de carbono; por otra parte, los cultivos mixotróficos usan una combinación de fuente de carbono y de materiales orgánicos [56].

En un estudio llevado a cabo con diversas fuentes de carbono, incluyendo fructosa, glicerol, glucosa y acetato de sodio, se evaluó el crecimiento celular y el contenido de lípidos. Los resultados indicaron que la glucosa es la fuente de carbono más efectiva para el crecimiento celular en cultivos mixotróficos de las cepas de *Chlorella sp* [62].

Por otro lado, el análisis del impacto de diversas fuentes de carbono, como el CO₂, bicarbonato de sodio, acetato de sodio, glucosa, sacarosa y glicerina, en el crecimiento de *Chlorella vulgaris* revela que la curva de crecimiento más favorable se alcanza en condiciones mixotróficas utilizando glucosa como fuente de carbono [63].

- **Efecto de la concentración de nutrientes**

Para lograr un crecimiento óptimo, las microalgas requieren cantidades adecuadas de macronutrientes y micronutrientes. Los macronutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, son esenciales para el crecimiento y desarrollo general de las microalgas, mientras que los micronutrientes, incluidas las vitaminas y los oligoelementos, se requieren en cantidades más pequeñas pero son igualmente importantes para su crecimiento [64].

La elección del medio de cultivo está influenciada por diversos factores, como el producto objetivo, la tasa de crecimiento y el costo del medio, entre otros. No obstante, el contenido de nitrógeno se establece como el factor más determinante en la selección del medio, dado que juega un papel crucial en el crecimiento de las microalgas y en la producción de lípidos [65]. Es importante mencionar que los nutrientes son agregados en exceso inicialmente, lue-

go del consumo existe una disminución de la concentración de los mismos en el medio [66].

Las microalgas pueden absorber nitrógeno de diferentes fuentes, como nitratos, amonio y la urea. Se prefiere el uso de nitrato en el cultivo de microalgas en lugar de sales de amonio, debido a su mayor estabilidad y menor probabilidad de alterar el pH. Aunque la limitación de nitrógeno puede disminuir la producción de biomasa, también puede favorecer la acumulación de lípidos. Investigaciones han demostrado que la falta de nitrógeno en cultivos de *Anabaena variabilis* y *Nostoc muscorum* reduce las tasas de crecimiento y los niveles de pigmentos fotosintéticos, lo que a su vez disminuye el secuestro de CO₂, pero incrementa el contenido total de carbohidratos y lípidos. Por lo tanto, mientras que niveles elevados de nitrógeno maximizan la productividad de biomasa, la reducción del nitrógeno dirige el metabolismo hacia una mayor producción de lípidos en las microalgas [64].

El fósforo (P) es otro macronutriente esencial para las microalgas. Es un componente crítico de los ácidos nucleicos, ATP (adenosín trifosfato) y fosfolípidos, que son esenciales para la transferencia de energía y la estructura de la membrana. Las microalgas pueden obtener fósforo a partir de compuestos de fosfato presentes en el medio de crecimiento. Junto con el carbono, el nitrógeno y el fósforo son nutrientes primarios necesarios para construir la biomasa de las microalgas a través de la fotosíntesis y el metabolismo celular. El equilibrio óptimo depende de la especie, con proporciones molares óptimas de C: N entre 9:1 y 22:1. La proporción molar de N: P varía entre 1,1 y 45:1 para varias microalgas. Las microalgas requieren ciertas vitaminas para

su crecimiento y metabolismo. Las vitaminas, como la tiamina (B1), la biotina (B7) y la cobalamina (B12), actúan como cofactores para varias reacciones enzimáticas involucradas en los procesos celulares. Además, las microalgas requieren oligoelementos como manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y molibdeno (Mo) para diversos procesos metabólicos [64].

- **Efecto de la velocidad de aireación**

La velocidad de aireación es uno de los parámetros que influye en el medio de cultivo microalgal. La forma en la que se introduce la aireación al cultivo depende de varios factores como el tipo de microalga, el medio de cultivo, el tipo de sistema (abierto o cerrado). Por ejemplo, para cultivos a escala laboratorio se introduce aireación a sistemas cerrados. La mezcla aire-CO₂ introducida es enriquecida de CO₂ a una concentración específica. De manera general, el crecimiento microalgal mejora al incrementar la tasa de aireación. En base a literatura, se conoce que las microalgas soportan una concentración de CO₂ de hasta el 5 %, concentraciones mayores generan inhibición de crecimiento [67].

Al aumentar las concentraciones de CO₂ en el medio de cultivo se incrementa la tasa de fijación de CO₂ y la concentración celular, sin embargo, altas concentraciones de CO₂ no son eficaces para la fijación de CO₂ [68].

- **Concentración del medio de crecimiento**

Uno de los parámetros importantes para el crecimiento de las microalgas es la concentración inicial de las microalgas. La tasa del crecimiento de las microalgas está directamente relacionada con la concentración celular, esta

aumenta hasta la concentración óptima cuando la concentración inicial de las microalgas es menor en comparación con la concentración de la luz y el CO₂ absorbido. Después de esto, la tasa de crecimiento disminuye con la concentración de microalgas, ya que el agotamiento continuo del CO₂ y de nutrientes supera las ventajas de contar con una mayor cantidad de microalgas.

Al cosechar el exceso de microalgas que se forma por encima de la concentración óptima, se puede alcanzar un nivel ideal que favorezca la máxima tasa de crecimiento de estas. Este proceso puede realizarse de manera continua, lo que permite reducir el tamaño del biorreactor necesario para alcanzar una tasa de producción específica. Sin embargo, una mayor concentración celular de microalgas puede intensificar el efecto de sombreado y disminuir la penetración de luz en el medio de cultivo, lo que a su vez limita la disponibilidad de nutrientes y puede llevar al cultivo a la fase de declive [33].

2.3 Consideraciones para el dimensionamiento de fotobiorreactores tubulares

El dimensionamiento de un fotobiorreactor tubular prototipo de 1000 litros (1 m³) se basa en una serie de factores técnicos y operativos. Con el fin de asegurar una distribución homogénea de las microalgas en el sistema y un buen crecimiento del cultivo se consideran las siguientes partes principales (Figura 15):

- Receptor solar (sistema de tubos)
- Columna de desoxigenación
- Inyección de aire
- Inyección de CO₂
- Bomba de recirculación y mezclado

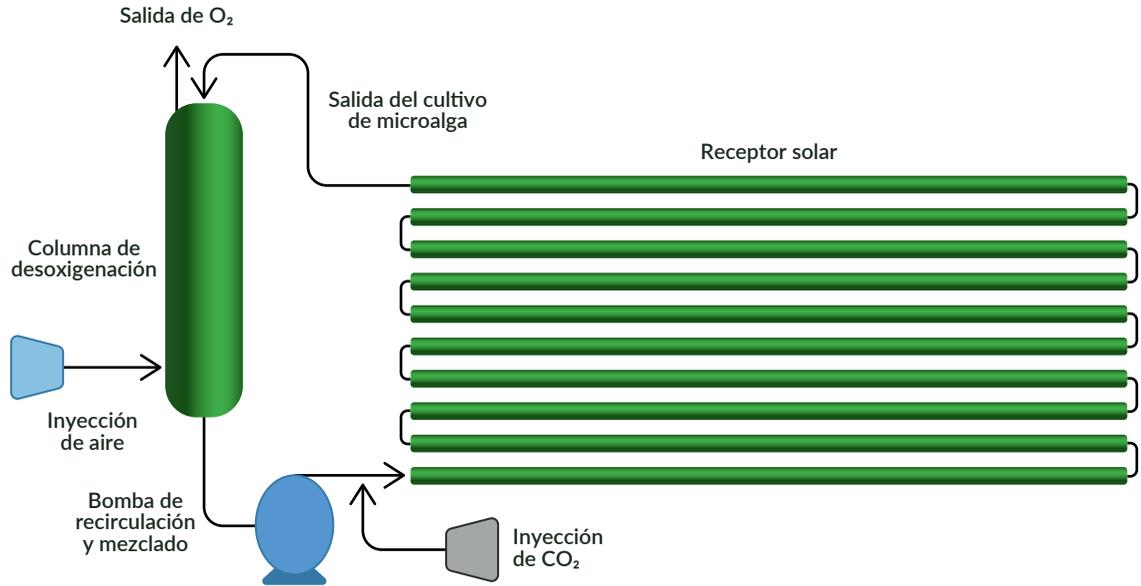


Figura 15: Esquema básico del fotobiorreactor tubular.

2.3.1 Receptor solar (sistema de tubos)

El receptor es uno de los componentes principales de un fotobiorreactor tubular, junto con la columna de desoxigenación [69]. Para el diseño del colector solar se pueden considerar diferentes factores como la superficie de los tubos, la acumulación de oxígeno, el régimen de flujo en el interior del colector, entre otros. Para el presente caso de dimensionamiento, el volumen de cultivo deseado es el punto de partida para el diseño, además se debe asumir el diámetro de la tubería, el cual acorde a la literatura científica, no puede ser excesivo debido a que se debe garantizar el paso de la luz a través del cultivo y evitar el auto sombreado (Figura 16), es por ello que se sugiere un diámetro máximo de 0,1 m [70].

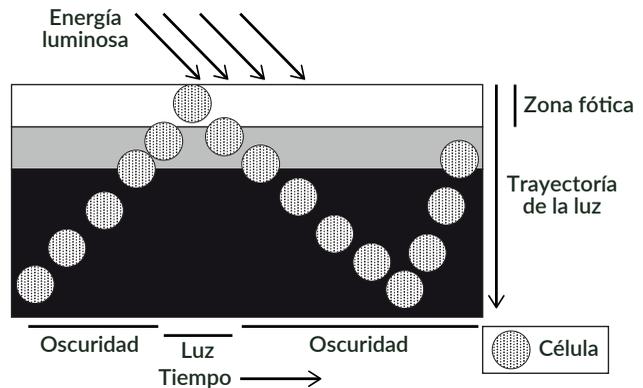


Figura 16: Trayectoria de la luz y ciclos luz/oscuridad dentro de un fotobiorreactor tubular.

Fuente: [70].

A partir de los datos de volumen de cultivo y de diámetro de la tubería se calcula la longi-

tud total del receptor solar como se indica a continuación:

$$L = \frac{4V}{\pi\phi^2}$$

Ecuación 2

Donde:

V, m^3 Volumen del cultivo
 ϕ, m Diámetro de la tubería

Con base a la longitud (L) obtenida, se debe calcular el número de pasos o lazos (N) que tendrá el colector solar, por lo que se sugiere tomar en cuenta las dimensiones de las tuberías disponi-

bles comercialmente y que serán elegidos para la implementación del tipo de reactores. Se recomienda no exceder los 80 metros de longitud de cada paso o lazo del colector [69].

$$N = \frac{L}{l_c * n}$$

Ecuación 3

Donde:

L, m Longitud total del receptor solar.
 l_c, m Longitud de la tubería comercial a ser utilizada.
 $n, [a]$ Número de tuberías comerciales que irían en serie por cada paso o lazo.

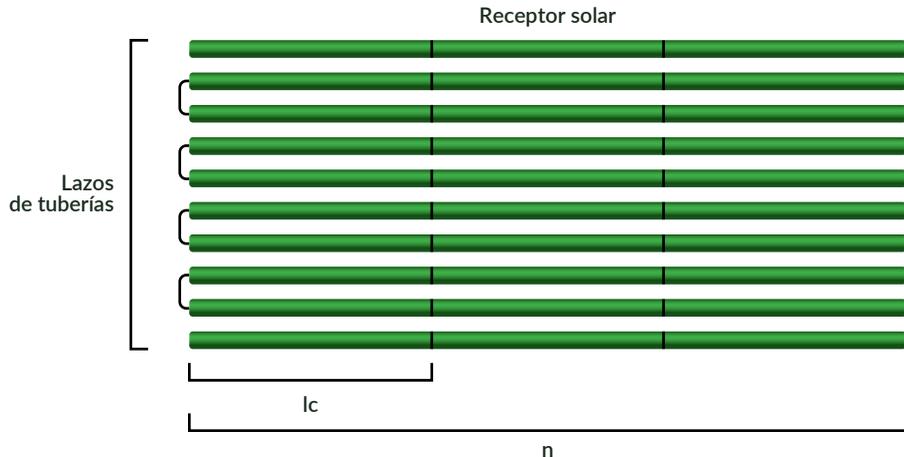


Figura 17: Esquema del receptor solar para el cálculo del número de pasos.

Además de lo mencionado anteriormente, es importante tener en cuenta que, para asegurar un mezclado adecuado dentro del colector solar, el flujo del cultivo debe ser turbulento,

es decir, con un número de Reynolds (R_e) superior a 3 000, sin exceder la velocidad máxima que las microalgas pueden tolerar para evitar daños celulares.



La velocidad máxima (v_{max}) tolerada por las células se determina en función de la longitud máxima de los microremolinos (λ) y de la tasa de energía disipada en el sistema de tubos (ξ),

la cual depende del coeficiente de fricción de Fanning (C_f) y el número de Reynolds (R_e), como se detalla a continuación:

$$\lambda = \left(\frac{\mu_L}{\rho}\right)^{\frac{3}{4}} \xi^{-\frac{1}{4}}$$

Ecuación 4

Donde: μ_L , Pa s ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Viscosidad dinámica del cultivo

 ρ , Kg m^{-3}

Densidad del cultivo

 λ , m

Longitud de los microremolinos o tamaño de la microalga para el cálculo de la velocidad máxima que toleran las células.

$$\xi = \frac{2 C_f U_L^3}{\phi}$$

Ecuación 5

Donde: C_f , [a]

Factor de fricción de Fanning

 U_L , m s^{-1} Velocidad del cultivo o velocidad máxima que toleran las células (v_{max}) ϕ , m

Diámetro de la tubería

$$C_f = 0,0791 R_e^{-\frac{1}{4}}$$

Ecuación 6

$$R_e = \frac{\rho U_L \phi}{\mu_L}$$

Ecuación 7

Donde: R_e , [a]

Número de Reynolds

 C_f , [a]

Factor de fricción de Fanning

 U_L , m s^{-1}

Velocidad del cultivo

 ϕ , m

Diámetro de la tubería

$$v_{max} = \frac{\mu_L \phi^{5/11}}{2^{4/11} 0,0791^{4/11} \lambda^{16/11} \rho_L}$$

Ecuación 8

La velocidad de operación del sistema de cultivo (v), se calcula en función de la longitud del receptor solar (L), las concentraciones de oxígeno disuelto y la tasa de generación vo-

lumétrica de oxígeno por la fotosíntesis de la microalga. Para el caso de la *Chlorella sp.* el valor mínimo que recomienda la literatura es $0,064 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$ [69].

$$v = \frac{R_{O_2} L}{O_{2 \text{ ent}} - O_{2 \text{ sal}}}$$

Ecuación 9

Donde:

$v, \text{ m s}^{-1}$	Velocidad de operación
$L, \text{ m}$	Longitud del receptor solar
$R_{O_2}, \text{ g m}^{-3} \text{ s}^{-1}$	Tasa de generación volumétrica de oxígeno por la fotosíntesis de la microalga
$O_{2 \text{ ent}} - O_{2 \text{ sal}}, \text{ g m}^{-3}$	Diferencia de las concentraciones de oxígeno disuelto de entrada y salida

2.3.2 Columna de desoxigenación

En el caso de los fotobiorreactores tubulares, al ser sistemas cerrados, el receptor solar provoca la acumulación de oxígeno disuelto generado durante la fotosíntesis. La acumulación de grandes cantidades de oxígeno disuelto en el circuito de tuberías puede inhibir el proceso fotosintético, e incluso llegar a causar la muerte de las microalgas debido a daños

oxidativos [71]. Por ello, una estrategia para eliminar el oxígeno disuelto acumulado consiste en incorporar una columna de desoxigenación, que recoge el cultivo a la salida del receptor solar y permite remover el oxígeno disuelto mediante burbujeo de aire.

El volumen total del recipiente se calcula en función de la siguiente ecuación:

$$V_{\text{tanque}} = \frac{R_{O_2} V_{\text{bucle}}}{K_{l a, O_2} ([O_2] - [O_2^*])}$$

Ecuación 10

Donde:

$R_{O_2}, \text{ g m}^{-3} \text{ s}^{-1}$	Tasa de regeneración de O_2
$V_{\text{bucle}}, \text{ m}^3$	Volumen del bucle de tubos (receptor solar)
$K_{l a, O_2}, \text{ s}^{-1}$	Coeficiente de transferencia de masa
$O_2, \text{ g m}^{-3}$	Concentración de oxígeno disuelto en el cultivo
$O_2^*, \text{ g m}^{-3}$	Concentración de oxígeno disuelto en equilibrio con la fase gaseosa
$V_{\text{tanque}}, \text{ m}^3$	Volumen del tanque requerido para la desoxigenación



Para aplicar esta ecuación, es necesario contar con datos sobre el coeficiente de transferencia de masa, los cuales pueden obtenerse de artículos científicos especializados. En estudios previos, se ha determinado que, para reducir una concentración de oxígeno disuelto del 300 % a menos del 150 % en la entrada al receptor solar, un valor de $0,13 \text{ s}^{-1}$ para el coeficiente de transferencia de masa es suficiente [72].

Usando el volumen del tanque calculado previamente y considerando los factores de diseño para el dimensionamiento de fotobiorreactores tubulares con tanques de desoxigenación, el diámetro y la altura del tanque se determina por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{H}{D_d} = c = 3 - 6$$

Ecuación 11

Donde:

H , m Altura del tanque
 D_d , m Diámetro del tanque (*downcomer*)

$$H = \sqrt[3]{\frac{4 c^2 V}{\pi}}$$

Ecuación 12

Donde:

c , [a] Factor recomendado de relación entre la altura y el diámetro del tanque (*downcomer*).
 V , m^3 Volumen del tanque de desoxigenación (*downcomer*)

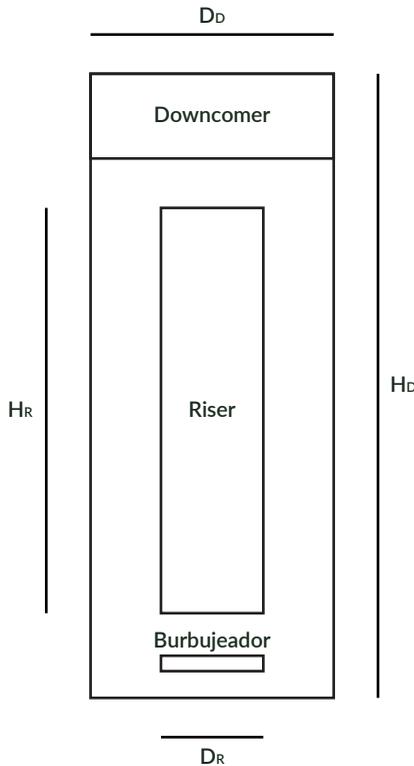


Figura 18: Parámetros de forma para el tanque de desoxigenación (*downcomer* y *riser*).
 Fuente: [73].

Un *riser* (elevador) es una sección cilíndrica al interior del tanque de desoxigenación que permite canalizar el flujo de aire permitiendo una mezcla eficiente con el cultivo y provocando un flujo ascendente de la mezcla gas - líquido. El diámetro (D_r) se calcula por medio de la siguiente relación diseño [73]:

$$\frac{D_r}{D_d} = 0,3 - 0,6$$

Ecuación 13

La longitud del elevador (H_r) es aproximadamente el 80 % de la altura total del tanque de desoxigenación (H).

Una parte fundamental de la columna de desoxigenación es el burbujeador, también conocido como difusor. Este dispositivo tiene la función de distribuir el aire en forma de burbujas, facilitando la remoción del oxígeno acumulado en el cultivo. Los difusores pueden variar según diversos factores, como el material de fabricación, la configuración geométrica de los orificios, el número y tamaño de los orificios, así como el área de paso [74].

Dentro de las configuraciones geométricas de los orificios, las más comunes son la triangular y la cuadrada. En la disposición triangular, los orificios se organizan de manera equidistante, formando un patrón de triángulos equiláteros. Este diseño optimiza el flujo de gas y líquido, mejorando la eficiencia del contacto entre las fases. Por otro lado, en la configuración cuadrada, los orificios se disponen en una cuadrícula regular, con filas y columnas alineadas, formando ángulos rectos entre sí. Aunque los difusores con esta configuración son más fáciles de fabricar, su eficiencia en la distribución del flujo es menor en comparación con la disposición triangular.

Para el dimensionamiento del difusor se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

$$D_f = 0,7 D_r \quad \text{Ecuación 14}$$

$$D_h = 1 \text{ a } 3 \text{ mm} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$A_{All\ holes} = A_{holes} * k \left(\frac{hole-diameter}{hole-pitch} \right)^2 \quad \text{Ecuación 16}$$

$$A_{All\ holes} = f * A_{Activa} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\text{Número de orificios} = \frac{A_{All\ holes}}{A_{holes}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

D_f , m	Diámetro del difusor (burbujeador)
D_h , m	Diámetro de un orificio
$A_{All\ holes}$, m ²	Área total de los agujeros
A_{holes} , m ²	Área del agujero
$hole-diameter$, m	Diámetro de agujero
$hole-pitch$, m	Longitud del paso
k , [a]	Constante que depende de la geometría de configuración de los agujeros. Para configuración triangular es igual a 0,905
A_{Activa} , m ²	Área del difusor calculado a partir de D_f
f , [a]	Factor que está entre 0,05 a 0,15.

2.3.3 Inyección de aire

La inyección de aire se lleva a cabo en la sección de desoxigenación, donde, mediante el difusor, se facilita el contacto entre el gas y el

líquido. Este proceso es esencial para eliminar el oxígeno acumulado en el cultivo debido a la fotosíntesis, lo que ayuda a prevenir la inhibición del crecimiento.

El flujo volumétrico de aire se calcula de la siguiente manera:

$$G = T_a * V_{tanque}$$

Ecuación 19

Donde:

G , l/min	Flujo volumétrico de aire
T_a , $v^{-1}min^{-1}$	Tasa de aireación recomendada entre 0,01 a 0,1
V_{tanque} , m^3	Volumen del tanque de desoxigenación (volumen de trabajo)

2.3.4 Inyección de dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono que ingresa a un fotobiorreactor puede provenir de gases de combustión o de tanques comerciales de CO₂. Es importante tener en cuenta la pureza o concentración del gas para suministrar la cantidad adecuada al cultivo y seleccionar el rango apropiado del regulador de flujo.

En cualquiera de los dos casos el ingreso del gas se realiza por medio de inyectores Venturi (Figura 19). Estos funcionan según el principio del efecto Venturi, que se basa en la aceleración del flujo de un fluido (para este caso, el cultivo de microalgas) a medida que pasa por un conducto de sección reducida. Esto genera una disminución de la presión en esa zona, lo que facilita la aspiración de otro fluido, como el dióxido de carbono, hacia el flujo principal en el interior del fotobiorreactor.

41

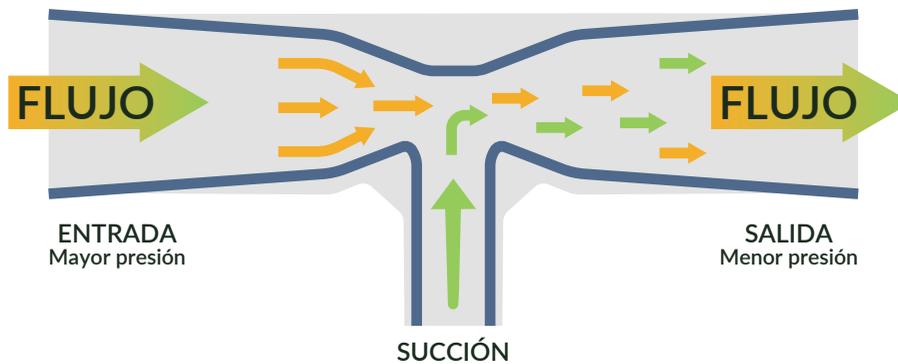


Figura 19: Inyector con efecto Venturi.
 Fuente: [75].

Los inyectores Venturi están disponibles comercialmente y deben seleccionarse en función del flujo de CO₂ que se va a suministrar

al fotobiorreactor. Para garantizar el efecto Venturi, la configuración del inyector debe ser la siguiente:

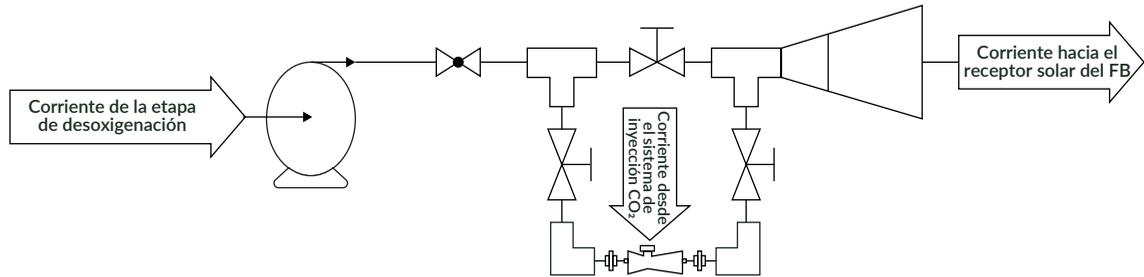


Figura 20: Configuración recomendada para el inyector Venturi en el fotobiorreactor.

2.3.5 Bomba de recirculación

Para el dimensionamiento de la bomba de recirculación es necesario conocer las pérdidas por fricción totales. Esta información garantiza que el sistema funcione de manera eficiente, minimizando los costos operativos, evitan-

do problemas de sobrecarga y asegurando que el fluido se transporte con la presión y el caudal adecuados a través de las tuberías.

Las pérdidas de fricción totales en el interior de un fotobiorreactor tubular se pueden determinar de la siguiente manera:

$$H_T = \sum h_f + \sum h_m \quad \text{Ecuación 20}$$

$$h_f = f_D \frac{L v^2}{2Dg} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$h_m = K \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

H_T, m	Pérdidas por fricción totales
h_f, m	Pérdidas por fricción primarias
h_m, m	Pérdidas por fricción menores (debido a accesorios como codos, válvulas, uniones, etc.)
$v, m s^{-1}$	Velocidad del fluido
D, m	Diámetro de la tubería
$g, m s^{-2}$	Aceleración de la gravedad
$K, [a]$	Coefficiente determinado en forma empírica para cada tipo de punto singular (accesorios)
$f_D, [a]$	Factor de fricción (Carta de Moody - Figura 12)
L, m	Longitud total del bucle

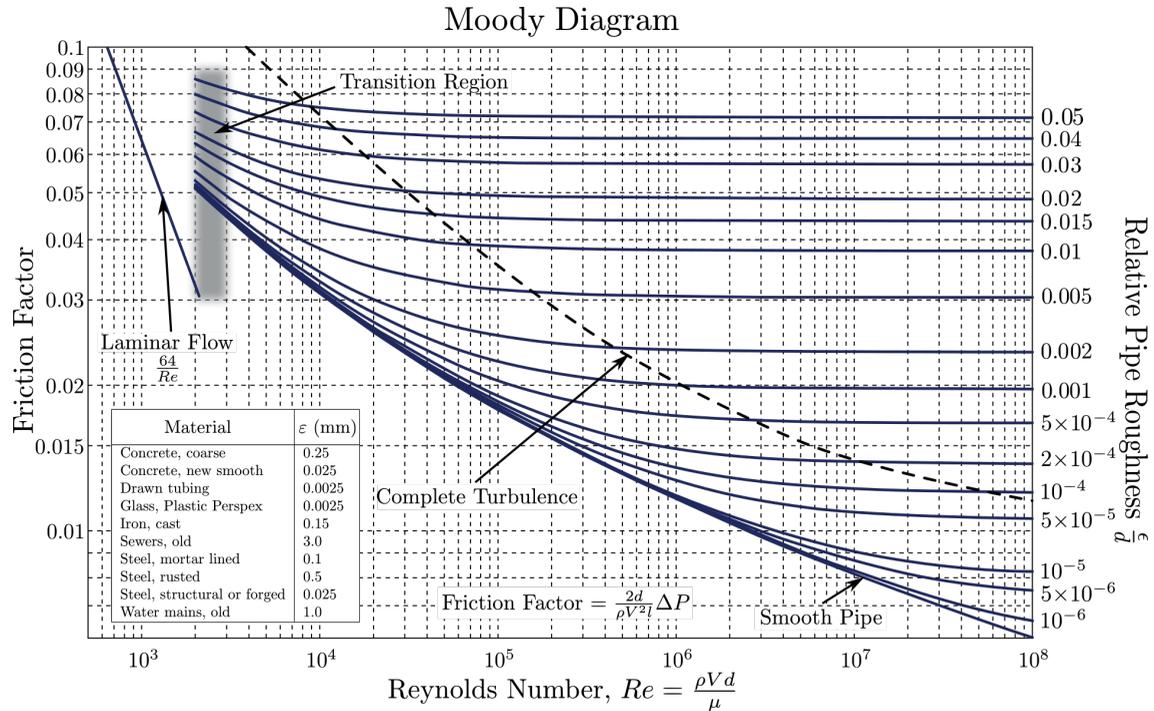


Figura 21: Carta de Moody para determinar el factor de fricción.
 Fuente: [76].

Una vez determinadas las pérdidas por fricción, se calcula la potencia requerida en el circuito de tuberías utilizando la siguiente ecuación:

$$P = H_T * \rho * g * Q$$

Ecuación 23

Donde:

- P, W Potencia requerida en el sistema
- $\rho, \text{kg m}^{-3}$ Densidad del fluido
- $Q, \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ Flujo volumétrico del líquido

Finalmente la potencia de la bomba (P_b) de recirculación y mezclado del cultivo de microalgas se determina como se indica a continuación:

$$P_b = \frac{P}{\varepsilon}$$

Ecuación 24

Donde:

ε , [a] Eficiencia de la bomba (0 a 1). Para el dimensionamiento generalmente se emplea un valor de 0,75.





Capítulo 3.

Proceso de captura
de carbono.



Capítulo 3.

PROCESO DE CAPTURA DE CARBONO

3.1 Biofijación de dióxido de carbono con microalgas

Las técnicas biotecnológicas para la fijación de CO_2 emplean reactores para promover reacciones fotosintéticas, donde las microalgas actúan como biocatalizadores en una serie de procesos bioquímicos que permiten la conversión del CO_2 en productos metabólicos fotosintéticos. Las microalgas tienen la capacidad de emplear tres rutas distintas para la asimilación de carbono inorgánico: (1) asimilación directa de dióxido de carbono a través de la membrana plasmática; (2) utilización de bicarbonato mediante la activación de la enzima anhidrasa carbónica, que convierte HCO_3^- en CO_2 ; y (3) el transporte directo de bicarbonato a través de la membrana plasmática. La biomasa de microalgas contiene alrededor del 50 % de carbono en peso seco. Este carbono se obtiene comúnmente del dióxido de carbono presente en distintas fuentes, que se dividen en: (i) CO_2 atmosférico, (ii) CO_2 de los gases generados por procesos industriales de combustión y (iii) CO_2 atrapado en forma de carbonatos solubles como $\text{NaHCO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$ [77]. Las microalgas, incluyendo *Chlorella*, también son capaces de utilizar fuentes de carbono orgánico, como la glucosa y el acetato [64].

Se estima que 100 toneladas de biomasa de microalgas pueden fijar 183 toneladas de CO_2 [78]. Cada tipo de microalga posee una concentración máxima de dióxido de carbono que puede tolerar, lo cual debe tenerse en cuenta al considerar la biofijación de CO_2 :

Tabla 2: Tolerancia a CO_2 en varios géneros y especies de microalgas.

Género / Especie	Concentración máxima conocida de CO_2 (%)
<i>Cyanidium caldarium</i>	100
<i>Scenedesmus sp.</i>	80
<i>Chlorococcum littorale</i>	60
<i>Synechococcus elongatus</i>	60
<i>Euglena gracilis</i>	45
<i>Chlorella sp.</i>	40
<i>Eudorina sp.</i>	20
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	15
<i>Nannochloris sp.</i>	15
<i>Chlamydomonas sp.</i>	15
<i>Tetraselmis sp.</i>	14

Fuente: [77].

Un suministro limitado de CO₂ suele ser el factor que restringe la productividad. El crecimiento de ciertas microalgas, como la *Chlorella sp.*, puede verse perjudicada cuando la concentración de CO₂ supera el 40 % (v/v). Aunque las microalgas pueden crecer en presencia de altas concentraciones de CO₂ en los gases de combustión, las tasas de fijación de carbono y producción de biomasa son inferiores en comparación con las concentraciones más bajas de CO₂ [78].

Para implementar la biofijación de CO₂ mediante microalgas en los gases de combustión de centrales termoeléctricas o industrias, es fundamental entender cómo los compuestos presentes en estos gases y ciertas condiciones de cultivo afectan al crecimiento de las microalgas. Los gases de combustión pueden incluir hasta 142 compuestos distintos, además del CO₂ [79].

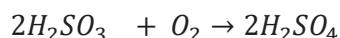
3.1.1 Influencia del Dióxido de azufre (SO₂)

El azufre es un elemento fundamental en los aminoácidos metionina y cisteína, así como en algunos lípidos. Es crucial para el crecimiento de las microalgas, y se absorbe en el citoplasma mediante un sistema de transporte de alta afinidad. Posteriormente, el sulfato se transfiere a los plástidos o vacuolas, don-

de se reduce gradualmente a sulfuro, el cual se incorpora directamente a los aminoácidos, principalmente a la cisteína [79]. Sin embargo, la presencia de SO₂ inhibe considerablemente el crecimiento, es así que cuando las concentraciones de este gas exceden las 100 ppm, resulta casi imposible cultivar la mayoría de las microalgas. Algunas especies logran crecer, aunque con dificultad, bajo condiciones de alta concentración de SO₂; no obstante, presentan una fase de latencia más prolongada, reducción en la fijación de carbono y disminución en la producción de biomasa en comparación con su crecimiento en ausencia de SO₂.

El SO₂ no necesariamente inhibe de manera directa el crecimiento de las microalgas. Los efectos negativos de este gas sobre su desarrollo se deben principalmente al incremento de la acidez en el medio de cultivo debido a la liberación de H⁺ durante la hidrólisis del SO₂ en el medio acuoso. Cuando el pH desciende por debajo de 3,0, las células de las microalgas mueren [78].

La solubilidad del SO₂ en agua es bastante alta, variando desde 23,0 g por 100 g de H₂O a 0 °C hasta 5,9 g por 100 g de H₂O a 40 °C. Cuando el SO₂ se disuelve en agua, forma H₂SO₃, que es ligeramente ácido, y este a su vez en presencia de oxígeno puede generar ácido sulfúrico (H₂SO₄) [79]:



Ecuación 25

Algunos estudios han señalado que el impacto del SO₂ sobre las microalgas no solo depende del valor del pH, sino también, de la presencia de SO₄²⁻ y HSO₄⁻ formados a partir de la hidró-

lisis del SO₂. Tanto el SO₄²⁻ como el HSO₄⁻ son factores que contribuyen a la inhibición del crecimiento de las microalgas [78].

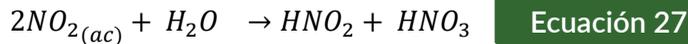
3.1.2 Influencia de los Óxidos de nitrógeno (NO_x)

En los gases de combustión, la concentración de NO_x oscila entre varios cientos y varios miles de ppm, con más del 90 % - 95 % de NO y

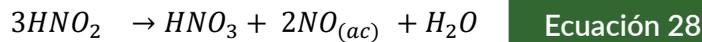
entre el 5 % - 10 % de NO_2 . Es poco probable que el NO impacte directamente el crecimiento de las microalgas a través del pH del medio de cultivo. Los NO_x se disuelven en el medio acuoso para formar ácidos conforme las siguientes ecuaciones [79]:



Ecuación 26



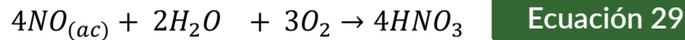
Ecuación 27



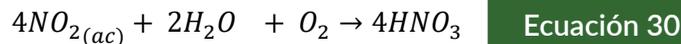
Ecuación 28

Además, dado que la mayoría de los biorreactores de microalgas contienen oxígeno, el NO

y el NO_2 pueden participar en las siguientes reacciones químicas:



Ecuación 29



Ecuación 30

Bajo la influencia de luz artificial o solar, la química del NO_x se vuelve más compleja debido a las reacciones con oxidantes fotoquímicos y la fotólisis de compuestos nitrogenados. Ade-

más, si tanto el NO_2 como el SO_2 están presentes en los gases de combustión, pueden reaccionar entre sí como se indica a continuación:



Ecuación 31

El nitrógeno, junto con el carbono, es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de la biomasa. Las microalgas tienen la capacidad de utilizar el nitrógeno en diversas formas, como NO_2^- , N_2 , NH_4^+ , NO y NO_3^- [79]. La concentración de NO suele tener un efecto dual sobre su crecimiento. Una concentración muy baja de NO puede ser absorbida por el medio y convertida en NO_2^- , que actúa como

fuerza de nitrógeno inorgánico para las microalgas. No obstante, esta influencia positiva es bastante restringida dado que al aumentar la concentración de NO, generalmente se observa una reducción en la tasa de crecimiento de las microalgas en la mayoría de las especies. El NO en niveles superiores a 300 ppm puede afectar negativamente el crecimiento de las microalgas [78].

3.1.3 Otros compuestos presentes en el gas de combustión

Hasta el momento, la relación entre las microalgas y compuestos como hidrocarburos no combustionados, O_2 , N_2 , C_xH_x , H_2O , CO , aerosoles, metales pesados y material particulado (PM) no ha sido investigada de manera exhaustiva. Aunque la incorporación de oxígeno puede mejorar la eficiencia en la eliminación de NO de los gases de combustión, también puede afectar negativamente la tasa de fijación de CO_2 al competir por la RuBisCO en el ciclo de Calvin. Durante el día, es poco probable que los niveles de O_2 en los gases de combustión influyan en el medio de cultivo, ya que se espera que la transferencia de oxígeno desde los gases sea lenta. Esto se debe a la combinación de bajos caudales de gases de combustión, la baja solubilidad acuosa, una alta concentración de oxígeno disuelto (COD) en el medio y una baja profundidad de cultivo. No obstante, el impacto potencial del oxígeno de los gases de combustión sobre la concentración de COD en los fotobiorreactores durante la noche sigue siendo una temática por investigar.

Las cianobacterias tienen la capacidad de fijar el N_2 presente en los gases de combustión, convirtiéndolo en amoníaco, nitritos o nitratos mediante la enzima nitrogenasa. Estos compuestos son absorbidos directamente y transformados en nitrógeno orgánico reducido, que se utiliza para la síntesis de proteínas. La fijación del nitrógeno suele ocurrir en los heterocistos, que son células especializadas que generan un entorno microanaeróbico para prevenir la desactivación de la nitrogenasa por el oxígeno [79].

La eliminación directa de CO y C_xH_y , por parte de las microalgas aún no se ha estudiado en gran medida, sin embargo, a escala de laboratorio se ha alcanzado la eliminación indirecta de metano (CH_4) utilizando un policultivo de varias cepas de microalgas y bacterias meta-notróficas. Además, se ha reportado que algunas cepas de microalgas emiten CO y varios alcanos y alquenos [80].

Aunque el material particulado (PM) presente en el gas de combustión no tienen un efecto letal en el cultivo de microalgas, se ha observado que su presencia disminuye la productividad de las microalgas cuando las concentraciones de níquel (Ni) y vanadio (V) disueltos superan los 1 y 0,1 $mg\ l^{-1}$, respectivamente. Los gases de combustión provenientes de sistemas de incineración de carbón, biomasa y residuos contienen diversos metales pesados que pueden afectar el crecimiento de las algas. Se sabe que las microalgas absorben fácilmente trazas metálicas, lo que ha llevado a sugerir su uso como estrategia de biorremediación en sistemas contaminados con metales, tanto gaseosos como acuáticos. La absorción de metales por las microalgas puede ocurrir mediante bioacumulación (en algas vivas) o biosorción, cuando la eliminación no se regula metabólicamente. Algunos metales son esenciales para el crecimiento de la biomasa microalgal (como Fe, Co, Cu, Mg, Ni, Zn), y requieren ciertos metales pesados (en bajas concentraciones) para la síntesis de determinadas enzimas. Sin embargo, concentraciones altas de algunos metales pesados pueden ser muy tóxicas (por ejemplo, Cr, Hg, Pb).

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los efectos tanto positivos como perjudiciales de algunos de estos compuestos, así como, de los efectos de SO_x , NO_x y CO_2 sobre las microalgas [79].

Tabla 3: Resumen de los efectos positivos y negativos de los compuestos gaseosos de combustión en los cultivos de microalgas y su impacto recíproco.

Compuestos de gases de combustión	Compuestos de gases de combustión en microalgas		Microalgas en compuestos de gases de combustión	
	Efectos positivos	Efectos negativos	Efectos positivos	Efectos negativos
CO_2	Fuente de carbono	En altas concentraciones puede disminuir la productividad	Se puede eliminar mediante fotosíntesis.	Los COVs extracelulares producidos por microalgas pueden reducir la eficiencia de la absorción de CO_2
	El producto puede almacenarse mediante un mecanismo de captura de carbono	Es tóxico si el cultivo está muy acidificado	Las anhidrasas carbónicas producidas externamente mejoran la hidrólisis del CO_2 .	El aumento de la temperatura a través de la fotosíntesis reduce la solubilidad del CO_2
	Altera la composición bioquímica de las microalgas			El aumento de la tensión superficial reduce la solubilidad del CO_2
NO_x	Fuente de nitrógeno	Inhíbe el crecimiento	Elimina NO_x mediante absorción	La producción de metabolitos aumenta la tensión superficial, lo que a su vez disminuye la solubilidad.
	Equilibra el aumento del pH debido al crecimiento microbiano	Puede ser tóxico para algunas cepas de microalgas	Los bioquelantes producidos por microalgas mejoran la disolución de NO	Las microalgas pueden producir NO cuando se alimentan con nitratos.
			Previene la oxidación y la inactivación del agente quelante de NO	
SO_x	En bajas concentraciones, sirve como fuente de azufre y es consumido y metabolizado por las células en forma de sulfato.	Inhíbe el crecimiento	Puede ser consumido por las microalgas una vez que el SO_x se oxida a sulfato.	Puede producir compuestos de azufre volátiles.
		Puede ser tóxico debido a la formación de bisulfito y a la disminución del pH		



Compuestos de gases de combustión en microalgas		Microalgas en compuestos de gases de combustión		
Compuestos de gases de combustión	Efectos positivos	Efectos negativos	Efectos positivos	Efectos negativos
CO	Fuente de carbono		Consumido por las microalgas una vez oxidado a CO ₂	Muchas cepas de microalgas solo pueden oxidar una pequeña parte del CO.
			Producido por las microalgas	
Metales pesados	Fuente de oligoelementos esenciales	Inhibe la acumulación de lípidos en altas concentraciones	Eliminado por microalgas mediante fijación y adsorción	
	Modifica el metabolismo de las algas y la actividad de la anhidrasa carbónica	En concentraciones más altas, los metales pesados como As, Co, Cd, Cr, Hg, Cu, Ni, Se, Pb y Zn inhiben la tasa de crecimiento y la capacidad de captura de CO ₂ de las microalgas	Eliminado por precipitación debido al aumento del pH que se genera en la fotosíntesis	
	Con las concentraciones máximas que se encuentran normalmente en los gases de combustión, se puede mejorar el crecimiento y la acumulación de lípidos	La biomasa de microalgas cargada de metales no se puede utilizar para producir productos de valor agregado		
		Daña el sistema de membranas		
		Tóxico en altas concentraciones		

Compuestos de gases de combustión	Compuestos de gases de combustión en microalgas		Microalgas en compuestos de gases de combustión	
	Efectos positivos	Efectos negativos	Efectos positivos	Efectos negativos
C_xH_y	Fuente de carbono		Producido por microalgas	
H_2O	Actúa como donante de electrones durante la fotosíntesis.		Consumido por microalgas durante la fotosíntesis	
O_2	Actúa como aceptor de electrones para la fotorrespiración.	Las membranas celulares pueden resultar dañadas debido a los radicales tóxicos del oxígeno.	Eliminada por microalgas mediante fotorrespiración	Producción de O_2 durante la fotosíntesis
		Disminuye la absorción de CO_2 al competir por la Rubisco.		La producción metabólica aumenta la tensión superficial
				El aumento de la temperatura a través de la fotosíntesis disminuye la solubilidad del O_2

Fuente: [79].

Con las consideraciones anteriores existen algunos factores clave que influyen en la eficiencia fotosintética de las microalgas y en la asimilación de CO_2 . En este sentido, los perfiles fisicoquímicos (pH, temperatura, etc.) y de nutrientes de los medios de cultivo, las propiedades de los gases de combustión (concentración de CO_2 , temperatura, compuestos

tóxicos), la intensidad luminosa y la penetración de la luz, el diseño del biorreactor y la selección de especies de microalgas influyen significativamente en la biofijación de CO_2 . En la Tabla 4 se presentan varios factores importantes que influyen en el crecimiento de las microalgas y en la tasa de biofijación de CO_2 .

Tabla 4: Eficiencia de la captura de CO₂ por diversas especies de microalgas bajo distintas condiciones experimentales.

Género / Especie	CO ₂ (%)	Tasa aireación (vvm)	Tasa de biofijación CO ₂ (mg l ⁻¹ día ⁻¹)	Producción de biomasa (g l ⁻¹)
<i>Botryococcus braunii</i>	10 % en mezcla con N ₂	0,1	356	0,41
	20 % en mezcla con N ₂	0,1	532	0,26
<i>Scenedesmus sp.</i>	10 % en mezcla con N ₂	0,1	347	0,90
	20 % en mezcla con N ₂	0,1	2177	1,95
<i>Heynigia riparia SX01</i>	0,03 % (Aire ambiente)	0,13	270	1,28
	5 % en mezcla con aire	0,13	370	2,37
	10 % en mezcla con aire	0,13	460	2,76
	15 % en mezcla con aire	0,13	710	3,28
<i>Chlorella vulgaris</i> ESP-31 (tipo salvaje)	Gas de combustión simulado 25 % CO ₂	0,1	53,35	0,15
<i>Chlorella vulgaris</i> ESP-31 (mutante 283)	Gas de combustión simulado 25 % CO ₂	0,1	272,06	0,78
<i>Chlorella vulgaris</i> ESP-31(mutante 359)	Gas de combustión simulado 25 % CO ₂	0,1	194,03	0,64
	Aire ambiente	0,5	55	≈ 0,22
	6 % en mezcla con aire	0,5	67	≈ 0,26
	20 % en mezcla con aire	0,5	16	≈ 0,09
	20 % en mezcla con N ₂ (Flujo constante)	0,5	43	≈ 0,30
<i>Dunaliella salina</i>	20 % en mezcla con N ₂ (Incremento gradual de CO ₂)	0,5	106	≈0,16
	2 % en mezcla con aire	0,4	1500	6,90
<i>Chlorella vulgaris</i> P12	6 % en mezcla con aire	0,4	2290	10,0
	10 % en mezcla con aire	0,4	1930	8,60
	Gas de combustión con 10 % de CO ₂	0,5	261	1,20
<i>Chlorella sp.</i>	Gas de combustión con 10 % de CO ₂	0,5	261	1,20
<i>Scenedesmus obtusiusculus</i>	Gas de combustión con 4 % - 5 % de CO ₂	-	111,4	1,09
<i>Chlorogleopsis sp.</i>	5 % de CO ₂	-	20,45	-
<i>Euglena sp.</i>	5 % de CO ₂	-	382	-
<i>Graesiella sp.</i>	15 % de CO ₂	-	260	-

Fuente: [79][33].

3.2 Cálculo de la biofijación de carbono

Para la determinación de la tasa de biofijación de carbono es necesario conocer la cinética de crecimiento del cultivo de microalgas, el mismo se puede describir generalmente a través de una curva de crecimiento que consta de varias fases, como se detalla a continuación:

- **Fase de adaptación (Lag):** En esta fase inicial, las microalgas se adaptan a las nuevas condiciones del medio de cultivo. Durante esta etapa, no hay un aumento significativo en la biomasa, ya que las células están ajustándose al entorno, activando procesos metabólicos y preparándose para la división celular. La duración de esta fase puede variar según la especie de microalga y las condiciones del cultivo.
- **Fase exponencial (de crecimiento logarítmico):** Una vez que las microalgas han superado la fase lag, entran en la fase exponencial. Aquí, las células se dividen a un ritmo constante y la biomasa aumenta de manera exponencial. Las condiciones son óptimas en términos de nutrientes, luz y temperatura, lo que favorece el crecimiento. Esta fase se caracteriza por un aumento rápido de la concentración de microalgas.
- **Fase estacionaria:** A medida que los nutrientes comienzan a agotarse y los desechos metabólicos se acumulan, el crecimiento de las microalgas empieza a desacelerarse. En esta fase, la tasa de crecimiento se equilibra con la tasa de muerte celular. La biomasa total alcanza un máximo y se estabiliza.
- **Fase de muerte (o declive):** Finalmente, en esta fase, las condiciones del medio se vuelven desfavorables para el crecimiento de las microalgas. La falta de nutrientes, el aumento de la toxicidad de los desechos y otros factores pueden llevar a una disminución en la población celular. La tasa de muerte celular supera la tasa de división, resultando en una disminución de la biomasa.

Estas fases de crecimiento pueden ser influenciadas por diversos factores, como el tipo de microalga, las condiciones ambientales (temperatura, luz, pH), la composición del medio de cultivo y la densidad celular. Es importante monitorear estas fases para optimizar el cultivo de microalgas según los objetivos deseados, ya sea para la producción de biomasa, aceites o compuestos bioactivos

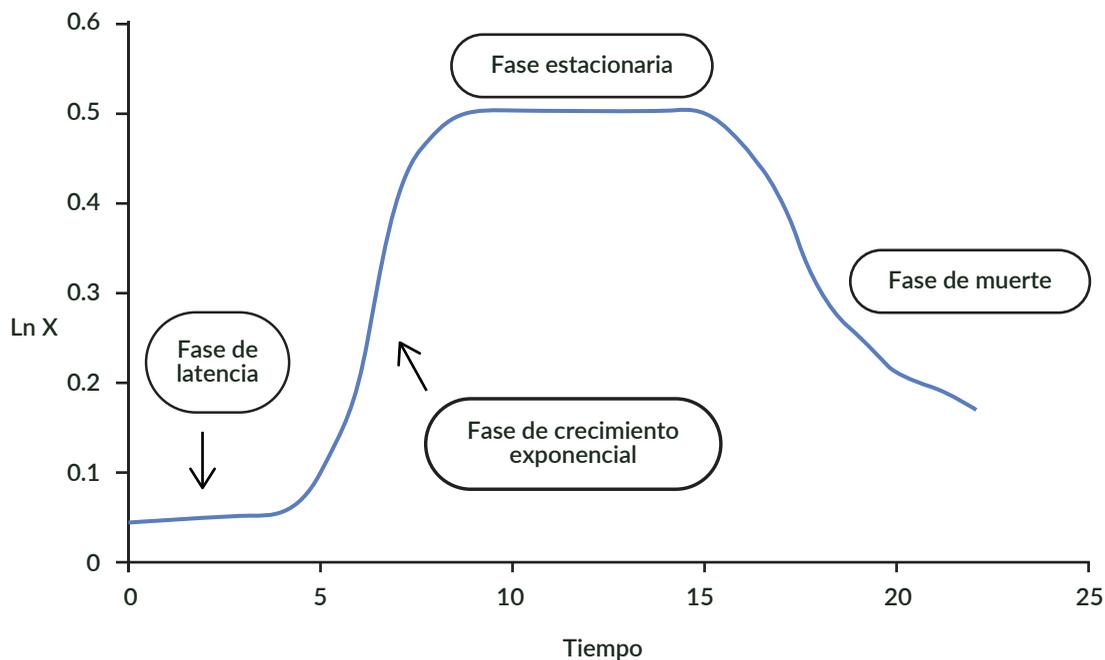


Figura 22: Curva de crecimiento típica de microalgas, en la cual se indican las diferentes fases. Número logarítmico de la cantidad de células en el cultivo vs. Tiempo.

Fuente: [81].

Para la determinación de la tasa específica de crecimiento se considera como premisa que la fase exponencial de crecimiento de la curva puede ser modelada como una ecuación de pri-

mer orden [82]. Con base en lo mencionado, se presenta la siguiente ecuación para el cálculo de la tasa de crecimiento específica de las microalgas en la fase exponencial de crecimiento.

$$\mu = \frac{\ln(X_t/X_o)}{t-t_o}$$

Ecuación 32

Donde:

μ , días ⁻¹	Tasa específica de crecimiento
X_t , g l ⁻¹	Concentración de células al tiempo t
X_o , g l ⁻¹	Concentración inicial de células
t, días	Tiempo
t_o , días	Tiempo de inicio



A partir de la curva de crecimiento, se calcula la productividad de la biomasa conocida también como la velocidad de producción microalgal, como se indica a continuación:

$$P = \frac{X_n - X_o}{t_n - t_o}$$

Ecuación 33

Donde:

P , g l ⁻¹ días ⁻¹	Productividad de la biomasa
X_n , g l ⁻¹	Concentración de células al tiempo t
X_o , g l ⁻¹	Concentración inicial de células
t_n , días	Tiempo
t_o , días	Tiempo de inicio

Finalmente para la determinación de la tasa de fijación de carbono o biofijación (mg l⁻¹ día⁻¹) se aplica la siguiente ecuación:

$$CO_2_{tasa\ de\ fijación} = P * C_{carbono} * \frac{M_{CO_2}}{M_c}$$

Ecuación 34

Donde:

P , g l ⁻¹ días ⁻¹	Productividad de la biomasa
$C_{carbono}$, %p/p	Contenido de carbono en la biomasa
M_{CO_2} , g mol ⁻¹	Masa molecular del CO ₂
M_c , g mol ⁻¹	Masa molecular del carbono



Capítulo 4.

Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal de *Chlorella sp.*, utilizando fotobiorreactores.

Capítulo 4.

ESTUDIO DE CAPTURA DE CARBONO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE BIOMASA MICROALGAL DE CHLORELLA SP., UTILIZANDO FOTOBIORREACTORES

El proyecto “Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal, *Chlorella Sp*, utilizando fotobiorreactores”, fue ejecutado por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) con financiación de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Su objetivo fue realizar pruebas experimentales de fijación de CO₂ mediante microalgas (*Chlorella sp.*), como una alternativa para mitigar el cambio climático y generar energía renovable.

- Las actividades realizadas abarcaron la determinación de las mejores condiciones

de cultivo en laboratorio, el escalado a nivel de prototipo mediante la construcción de un fotobiorreactor tubular para la producción masiva de microalgas y la biofijación de CO₂ de una planta termoeléctrica.

El prototipo fue diseñado por los investigadores del IIGE y cuenta con una capacidad nominal de 1000 litros, para el cultivo de microalgas con captura de CO₂ de fuentes fijas de combustión.

Además, es un prototipo móvil que puede ser transportado con facilidad para ubicarlo donde se requiera realizar pruebas de investigación.

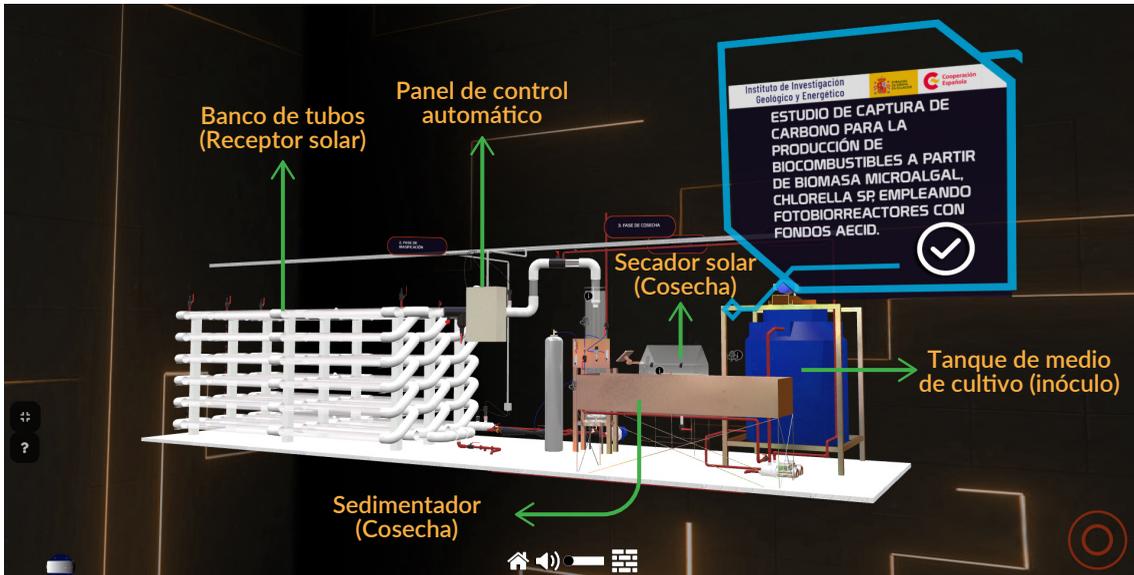
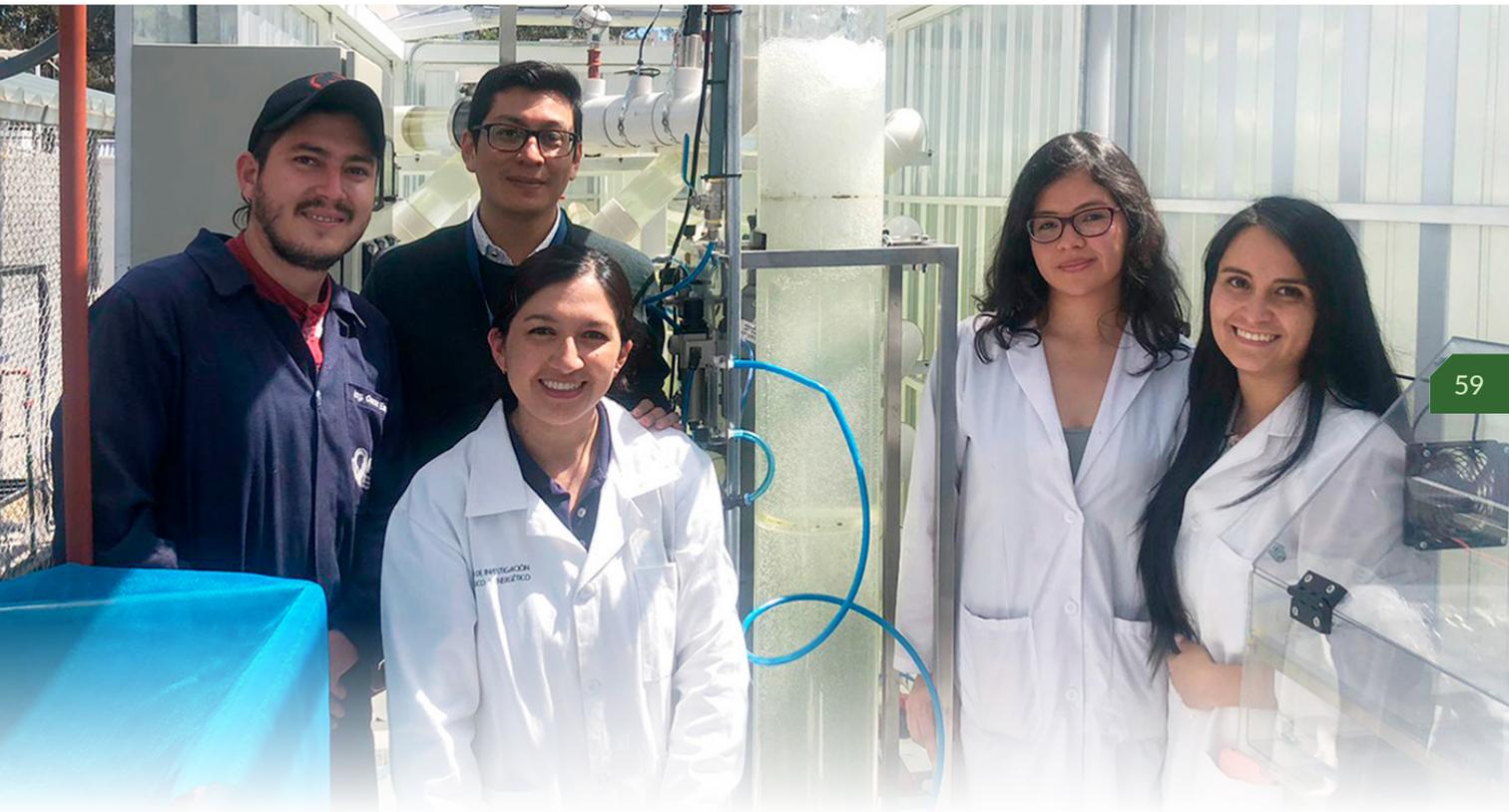


Figura 23: Fotobiorreactor prototipo de 1000 litros implementado por el IIGE.

Fuente: [83].

Las actividades llevadas a cabo en la experimentación abarcaron las siguientes etapas:

- Mejores condiciones de crecimiento en laboratorio
- Inoculación y escalamiento del cultivo
- Masificación del cultivo en el prototipo
- Biofijación de CO₂ de gases de combustión de termoeléctrica



*Figura 24: Equipo de investigación responsable del “Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal de *Chlorella sp.*, utilizando fotobiorreactores”.*

Fuente: IIGE, 2024.

4.1 Mejores condiciones de crecimiento en laboratorio

Las condiciones óptimas para el crecimiento de las microalgas se logran mediante un balance adecuado de nutrientes (principalmente N, P, C y sales inorgánicas) y condiciones ambientales (luz, temperatura, pH, agitación y aireación). Para este fin, el proyecto dispone de una cepa de *Chlorella sp.*, cultivada en placas de agar enriquecidas con nutrientes y almacenada en condiciones controladas de temperatura y luz.

Con esta cepa, se inició el cultivo de un inóculo madre en una cámara de flujo laminar, utilizando un medio de cultivo basado en un fertilizante comercial a una concentración específica.



Figura 25: Fertilizante comercial (N, P, K y vitaminas) utilizado para los cultivos.
Fuente: IIGE, 2024.



Figura 26: Preparación de inóculo para las pruebas de laboratorio.
Fuente: IIGE, 2024.

Para el caso de la investigación que desarrolló el IIGE, los factores que se estudiaron con más detalle fueron: nutrientes del medio de cultivo, aireación, concentración de CO_2 , e intensidad de iluminación. Es necesario determinar los valores óptimos para cada parámetro y su influencia en la composición de la microalga.

4.2 Inoculación y escalamiento del cultivo

Para alcanzar un volumen de inóculo suficiente para el inicio de la operación del fotobiorreactor tubular de 1 000 litros, se realizó un escalado de cultivo en dos etapas. La primera consistió en un banco de cinco (5) reactores en paralelo de siete (7) litros de volumen

de trabajo por cada uno, los cuales cuentan con un sistema de aireación para homogenizar el cultivo. En la segunda etapa del escalamiento de inóculo, se utilizaron sistemas de cultivo abiertos tipo *raceway*. En el sistema empleado

en este proyecto, se cultivó un volumen de 200 litros. Finalmente, este volumen obtenido se utilizó para inocular el fotobiorreactor prototipo de 1000 litros.



Figura 27: Preparación de inóculos en sistemas de cultivos cerrados tipo reactores tubulares.

Fuente: IIGE, 2024.

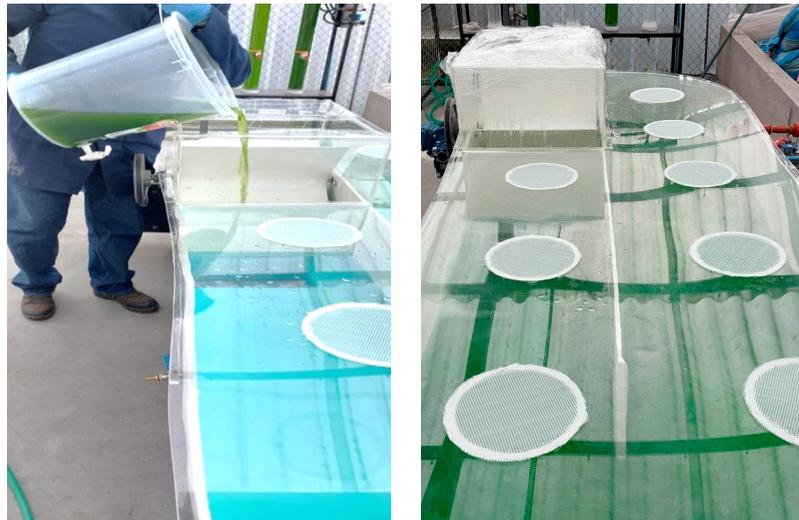


Figura 28: Preparación de inóculos en un sistema de cultivo abierto raceway de 200 litros.

Fuente: IIGE, 2024.

El esquema general del escalamiento del cultivo de *Chlorella sp.*, desde tamaño de laboratorio hasta el prototipo, se indica a continuación:

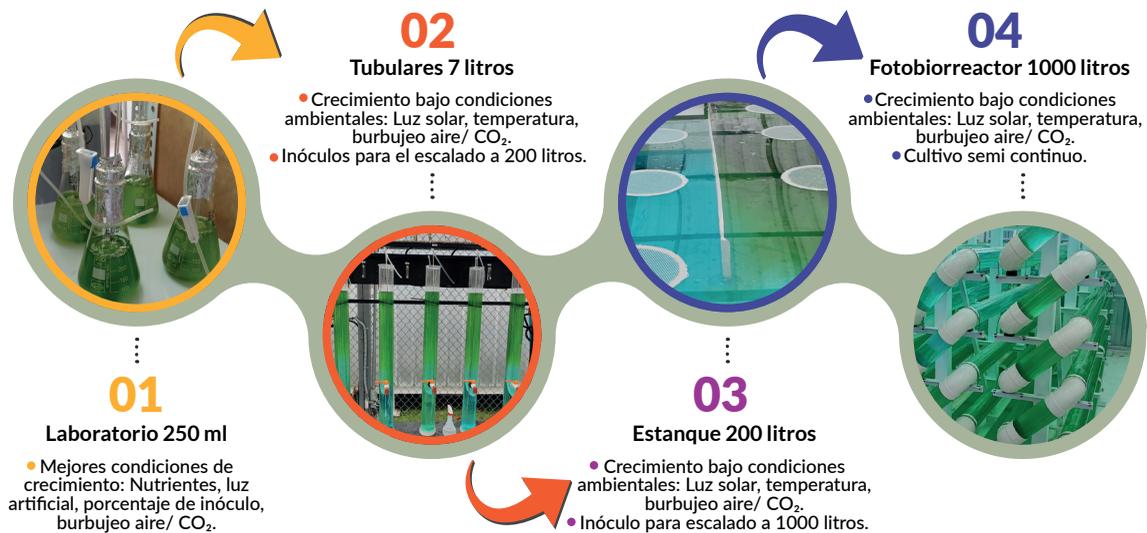


Figura 29: Escalamiento del cultivo “Estudio de captura de carbono para la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal de *Chlorella sp.*, utilizando fotobiorreactores”.

Fuente: IIGE, 2024.

4.3 Masificación del cultivo en el prototipo

El cultivo de microalgas en sistemas de fotobiorreactores cerrados ha demostrado ser una técnica eficiente para la producción a gran escala de microalgas. En este contexto, el IIGE construyó un reactor prototipo de 1000 litros, diseñado específicamente para monitorear las condiciones de crecimiento de

la microalga mediante la adición de dióxido de carbono. El cultivo realizado consideró cuatro etapas principales:

- **Inoculación:** Llamada también siembra, es el proceso donde se introduce una pequeña cantidad inicial de microalgas al fotobiorreactor, junto con una solución de medio de cultivo.



Figura 30: Preparación de la solución acuosa de medio de cultivo.
Fuente: IIGE, 2024.



Figura 31: Homogenización del medio de cultivo con el inóculo en el fotobiorreactor
Fuente: IIGE, 2024.

- **Masificación:** En esta etapa, las microalgas inician su crecimiento y reproducción aprovechando los nutrientes (N, P, K) presentes

en el medio de cultivo, así como el carbono suministrado a través de tanques de CO₂ comercial o de gases de combustión.



Figura 32: Cultivo de microalgas en el segundo día.
Fuente: IIGE, 2024.



Figura 33: Cultivo de microalgas en el séptimo día.
Fuente: IIGE, 2024.



Figura 34: Cultivo de microalgas durante el período comprendido entre el día 14 y el día 21.
Fuente: IIGE, 2024.

- **Cosecha:** Cuando el cultivo alcanza una alta concentración de microalgas, se extrae una cantidad específica y se reemplaza por el mismo volumen de medio de cul-

tivo fresco. El cultivo cosechado se deja reposar para permitir la sedimentación de las microalgas.



Figura 35: Toma de muestra del cultivo para medición de la concentración celular.
Fuente: IIGE, 2024.



Figura 36: Extracción del cultivo hacia un sedimentador.
Fuente: IIGE, 2024.



Figura 37: Pasta de microalgas obtenida tras la sedimentación del cultivo.
Fuente: IIGE, 2024.

- **Secado:** La pasta de microalgas obtenida en la etapa de sedimentación se somete a un proceso de eliminación de humedad,

conocido como secado, el cual se lleva a cabo de manera que se conservan las propiedades de la biomasa microalgal.

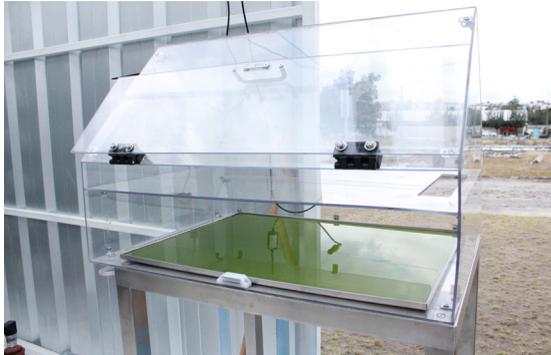


Figura 38: Secador de pasta de microalga implementado en el proyecto.
Fuente: IIGE, 2024.

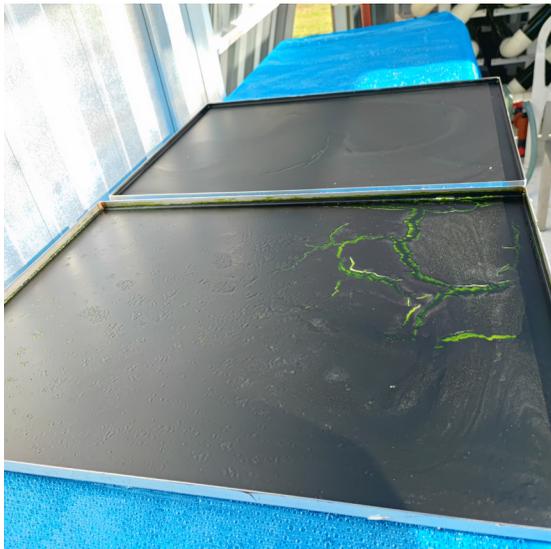


Figura 39: Bandejas con microalgas secas tras el proceso de secado.
Fuente: IIGE, 2024.



Figura 40: Biomasa de *Chlorella sp.* generada en el proyecto.
Fuente: IIGE, 2024.

4.4 Biofijación de CO₂ de gases de combustión de termoeléctrica

Para las pruebas de fijación de CO₂ de gases de combustión de una termoeléctrica se requirió implementar un módulo adicional en el fotobiorreactor prototipo del proyecto. El sistema de captación de gases se encuentra diseñado para captar las emisiones provenientes de una fuente fija de combustión, con el fin de direccionarlos al fotobiorreactor prototipo, en el cual estos gases, específicamente el

CO₂, se utilizó como fuente de carbono para el cultivo de *Chlorella sp.* Para este propósito los gases de combustión requieren ser enfriados previo a ser alimentados al cultivo, por tal motivo, el sistema contempló dos etapas de captación y transporte y dos etapas de enfriamiento. Adicionalmente, este sistema cuenta con su respectivo control automático y monitoreo de las variables de operación. A continuación se ilustra el sistema de captación de gases implementado:

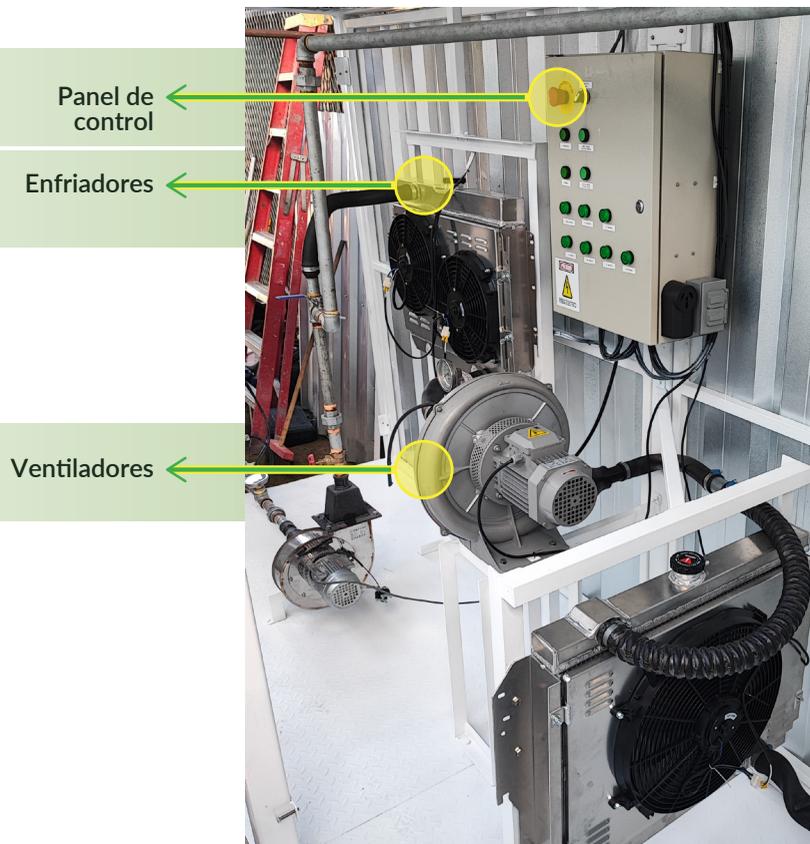


Figura 41: Módulo de captación de gases de combustión implementado en el proyecto.

Fuente: IIGE, 2024.



Figura 42: Prototipo para pruebas de fijación de CO₂ realizadas en la Central Térmica Gualberto Hernández de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ).
Fuente: IIGE, 2024.



Figura 43: Cultivo de *Chlorella sp.* alimentado con gases de combustión de la Central Térmica Gualberto Hernández de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ).
Fuente: IIGE, 2024.



*Figura 44: Equipo técnico responsable de las pruebas de biofijación de CO₂.
Fuente: IIGE, 2024.*



Figura 45: Visita de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo al fotobiorreactor prototipo.
Fuente: IIGE, 2024.



Capítulo 5.

Perspectivas futuras
para la biofijación de CO_2 .



Capítulo 5.

PERSPECTIVAS FUTURAS PARA LA BIOFIJACIÓN DE CO₂

Los procesos y tecnologías actuales de tratamiento de gases de combustión aplicados (desulfurización, absorción química, etc.) son soluciones fundamentales que no pueden conducir hacia la sostenibilidad debido a la participación de mayores insumos energéticos, costos y consideraciones ambientales. Las microalgas ofrecen un gran potencial para capturar CO₂ de los gases emitidos por las centrales termoeléctricas, lo que puede reducir la huella de carbono en la producción de energía convencional y promover un ambiente atmosférico más limpio. Además, este proceso puede crear nuevas alternativas para la producción de biocombustibles. La biofijación de carbono a través de microalgas es una tecnología amigable con el medio ambiente que funciona bajo condiciones de crecimiento controladas en biorreactores. Para maximizar sus beneficios en investigaciones futuras, se sugieren algunas recomendaciones tras un análisis exhaustivo de la literatura existente, enfatizando su enfoque integral para generar aire y agua más limpios, y para la creación de productos valiosos a partir de la biomasa de algas. Algunas direcciones de investigación futura y consideraciones específicas se indican a continuación [33]:

- Los efectos de los gases de combustión que contienen metales pesados, sobre la tasa de crecimiento y la acumulación de lípidos en las microalgas no se ha profundizado completamente, ya que se han in-
- vestigado principalmente las concentraciones de uno o dos metales. Sin embargo, los gases de combustión contienen una variedad de metales pesados, los cuales pueden generar diferentes impactos en el crecimiento de las microalgas.
- Aunque la generación de energía utilizando el calor de los gases de combustión y la captura de CO₂, integrando el cultivo de microalgas, es un proceso complejo que demanda una considerable inversión de capital, puede disminuir la huella de carbono de las plantas térmicas al ofrecer calor útil para otras aplicaciones. Este alto costo también puede justificarse al compararlo con los efectos negativos de los gases de efecto invernadero (GEI).
- El costo del biorreactor representa otro desafío en la biofijación de CO₂ de los gases de combustión de las plantas termoeléctricas. El reactor de estanque abierto es más económico en comparación con el fotobiorreactor cerrado. De manera similar, el fotobiorreactor cerrado requiere un mayor nivel de experiencia técnica y un mantenimiento más frecuente, mientras que en el reactor de estanque abierto, esta necesidad es considerablemente menor.
- Los subproductos de las microalgas obtenidos a partir de la utilización de gases de combustión no son puros, ya que están contaminados con diversos metales y

compuestos tóxicos. Por lo tanto, no son aptos para el consumo humano ni como alimento animal. En este sentido, es necesario eliminar completamente los metales tóxicos de los gases de combustión antes de introducirlos en el medio de cultivo de las microalgas, para asegurar que los subproductos estén libres de toxicidad por metales. Además, se requiere una investigación adecuada si se pretende utilizar estos subproductos para consumo humano o como alimento para animales.

- El alto costo del cultivo de microalgas representa una barrera significativa a nivel industrial, y la provisión de CO₂ implica un proceso que no solo es costoso, sino que también demanda un elevado consumo energético. Dado que el CO₂ presente en los gases de combustión se encuentra en estado gaseoso, es necesario capturarlo y comprimirlo. Por esta razón, la mayoría de los reactores abiertos tipo estanque y los fotobiorreactores cerrados para el cultivo de microalgas requieren CO₂ que sea soluble en agua.
- El bajo contenido de carbono y alto contenido energético están generando nuevos campos para la biofijación con microalgas mediante la obtención de carbón hidruro a partir de la mezcla de biomasa residual de microalgas y carbón, que puede aplicarse posteriormente en aplicaciones de calefacción.
- La identificación de especies en cuerpos de agua contaminados alrededor de las centrales térmicas de carbón podría ser

una fuente valiosa para obtener cepas resistentes a los compuestos presentes en los gases de combustión. Además, la ingeniería genética ofrece un nuevo enfoque que podría aumentar la tolerancia al CO₂ en estas fuentes puntuales, lo cual representa un área de investigación prometedora para el futuro.

- El CO₂ se puede introducir directamente en el cultivo de microalgas para su biofijación, pero a veces es difícil obtener un suministro estable y constante de CO₂ a menos que la ubicación del sistema de cultivo de microalgas esté muy cerca de una fábrica o una central termoeléctrica. Por lo tanto, una de las alternativas de preparar una fuente con gran cantidad de carbono inorgánico para el crecimiento de microalgas es capturar el CO₂ emitido por las industrias mediante absorción alcalina y almacenarlo en el líquido como iones bicarbonato (HCO₃⁻) y carbonato (CO₃²⁻). De esta manera, sería más fácil y conveniente suministrar una fuente de carbono para el crecimiento de las microalgas. Además, dado que el bicarbonato y el carbonato son mucho más solubles en agua que el CO₂, se podría evitar el problema de la baja solubilidad y el bajo tiempo de retención del CO₂ en el medio de cultivo. Sin embargo, la eficiencia metabólica y la composición de las microalgas resultantes del uso de CO₂ y bicarbonato/carbonato como fuente de carbono podrían ser diferentes de una especie a otra [77].
- Un estudio de viabilidad evalúa y analiza

el potencial de un proyecto propuesto, fundamentándose en investigaciones y análisis que respaldan el proceso de toma de decisiones. En el contexto de las microalgas, este estudio se divide en dos aspectos: 1) la viabilidad de las microalgas para la producción de biocombustibles y 2) la viabilidad de las microalgas para la captura y utilización de carbono. Hasta la fecha, se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre la viabilidad de la producción de biodiésel a partir de microalgas, que han arrojado diversas conclusiones. En contraste, existen escasos estudios sobre la captura y utilización de carbono mediante microalgas a nivel mundial. Aunque se han realizado investigaciones en el pasado, se necesita un análisis global que explore el cultivo de microalgas y su potencial para la captura y utilización de carbono, con el fin de determinar la viabilidad general de este cultivo y la cantidad de CO₂ que podría ser mitigado anualmente. Además, es crucial llevar a cabo más investigaciones sobre la viabilidad de las microalgas para abordar las lagunas existentes en este campo.

- La política energética forma parte de la política económica, la política exterior y la política de seguridad nacional e internacional de un país. Se considera que la energía debe ser fiable, accesible y sostenible. Por lo tanto, la política energética ha estado enfocada en garantizar el suministro, la asequibilidad y minimizar el impacto ambiental. Así, los enfoques de esta política pueden asistir a las industrias energéticas en la provisión de energía

para las futuras generaciones. El uso de microalgas como una fuente energética innovadora es un tema relevante debido al agotamiento de los combustibles fósiles y sus efectos en el medio ambiente. Es evidente que la implementación de políticas energéticas en relación con la captura y el uso de carbono a partir de microalgas pueden resultar efectivos. Además, la conexión entre la política energética y las microalgas, así como con las energías alternativas, subraya la importancia de las microalgas en este ámbito, lo que sugiere la necesidad de realizar más investigaciones para desarrollar futuras políticas energéticas. Asimismo, es claro que la incorporación de microalgas a los recursos energéticos de un país generará diversas políticas energéticas que ayudarán a los gobiernos a equilibrar la oferta y la demanda.

- Para transformar las microalgas en biocombustibles, es necesario llevar a cabo diversos procesos y utilizar varias tecnologías. Una vez separada la biomasa microalgal del medio de cultivo, se pueden realizar diferentes conversiones para producir biocombustibles, tales como pirólisis, hidrólisis, fermentación, etc., según las necesidades del mercado. Dado que existen múltiples tipos de microalgas con distintas composiciones químicas, es crucial que las investigaciones futuras se enfoquen en métodos eficaces y rentables para extraer el biocombustible deseado o productos de valor añadido a partir de las microalgas mediante diversas técnicas de conversión [84].

- La evaluación tecnoeconómica es una herramienta fundamental para estimar el rendimiento, las emisiones y el costo de una planta o proceso antes de su construcción. Este enfoque se basa en un análisis detallado que considera aspectos como el equipamiento, la mano de obra, los precios de los insumos y los costos de construcción. Dado el creciente interés en el cultivo de microalgas como una fuente sostenible de energía, se ha llevado a cabo exhaustivas evaluaciones tecnoeconómicas sobre la producción de biocombustibles a partir de estas algas. Diversos estudios han demostrado el verdadero potencial comercial de esta fuente renovable. Sin embargo, surge la incógnita de conocer cuál es el costo de expandir las industrias de microalgas para la captura de carbono. Abordar esta cuestión permitirá a los investigadores en el ámbito ambiental y energético trazar un camino más accesible hacia la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el combate al calentamiento global. A pesar de que se han logrado avances tecnológicos significativos para disminuir el costo del cultivo de microalgas, es crucial considerar diferentes técnicas de cultivo adaptadas a cada región. Esto se debe a que, además de las condiciones climáticas que afectan los cultivos abiertos tipo estanque, también influyen factores determinantes como la emisión de CO₂, el precio del combustible y los costos tecnológicos en la escalabilidad de la producción de microalgas.
- La huella de carbono se refiere a la cantidad de dióxido de carbono y otros compuestos de carbono que se emiten como resultado del consumo de combustibles fósiles por individuos o grupos. Este término está frecuentemente relacionado con la evaluación del ciclo de vida; así, en el caso de los combustibles, la huella de carbono incluye la suma de las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero generadas en cada fase de su ciclo de vida. Al identificar las huellas de carbono en diversas industrias, es posible determinar los lugares más adecuados para el cultivo de microalgas y la captura de carbono. Por ejemplo, las microalgas pueden ser empleadas para la captura directa de CO₂ del aire o para absorber carbono de diferentes sectores, como el de la industria cementera, las plantas de energía o las industrias metalúrgicas. Por lo tanto, las microalgas podrían tener un papel relevante en la reducción de la huella de carbono, una vez que se evalúe su viabilidad para la captura de carbono [84].
- Para alcanzar los objetivos climáticos establecidos para el año 2050, el *Global CCS Institute* proyecta la necesidad de implementar aproximadamente 2000 proyectos comerciales de captura de CO₂ anualmente, con un costo estimado que oscila entre 655 y 1280 mil millones de dólares. Promover la participación del sector privado mediante mecanismos de fijación de precios del carbono, tales como impuestos o sistemas de comercio de emisiones,

podría estimular la inversión en tecnologías de captura de CO₂. Además, las exenciones fiscales y los costos reducidos de instalación pueden facilitar la viabilidad comercial de estos proyectos. Es posible que las industrias con altas emisiones de CO₂ se vean obligadas a financiar y desarrollar iniciativas de captura. En este contexto, las microalgas, particularmente el género *Chlorella*, están emergiendo como una herramienta clave para capturar CO₂ y transformarlo en productos valiosos como el biohidrógeno. No obstante, para aprovechar al máximo el potencial de las microalgas, es fundamental continuar con la innovación en los ámbitos científico, comercial y técnico. La capacidad de producción de biohidrógeno resalta la versatilidad de *Chlorella* como materia prima en biorrefinerías. La combinación del crecimiento excepcional de las microalgas con el reciclaje de residuos favorece el desarrollo de una bioeconomía circular y sostenible [64].

- Las tecnologías biológicas son consideradas herramientas que contribuyen a la mitigación de emisiones de CO₂, entre las cuales los cultivos de microalgas emergen como alternativas promisorias que no solo permiten la captura de GEI, sino que también, proveen una amplia gama de productos de valor agregado y biocombustibles. Sin embargo, aunque varias empresas, institutos y gobiernos invierten en estas tecnologías, la producción comercial de biocombustibles es limitada. Una

razón es la factibilidad económica de la producción de biomasa a gran escala, que sigue siendo un gran obstáculo para su comercialización. En consecuencia, se han generado diferentes enfoques de investigación para reducir las brechas y proponer procesos que mejoren la competitividad de estas tecnologías. Algunos de los enfoques incluyen los cultivos mixotróficos, que proveen una fuente de carbono orgánico además del carbono inorgánico que favorecería el aumento del crecimiento celular y la productividad. Otra estrategia es la reutilización de aguas residuales de procesos industriales por considerarse fuentes promisorias para el suministro de nutrientes, conllevando así a una reducción en los costos del medio de cultivo (fósforo, nitrógeno, metales). Además, estos procesos brindan la oportunidad de reducir la contaminación por el agua generada por las industrias.

La combinación de microalgas y bacterias se presenta como una metodología eficiente, económica y sustentable para la producción de biohidrógeno, en comparación con el monocultivo, porque el intercambio mutuo de nutrientes y electrones facilita la producción de hidrógeno. Sin embargo, para la producción a escala industrial, las condiciones de operación deben estandarizarse, lo que constituye una oportunidad de investigación para lograr una producción mejorada y sustentable en el largo plazo mediante el uso de una amplia gama de fuentes de aguas residuales [85].

Microalgas:
Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable



Bibliografía

Bibliografía.

- [1] G. Li, W. Xiao, T. Yang, and T. Lyu, "Optimization and Process Effect for Microalgae Carbon Dioxide Fixation Technology Applications Based on Carbon Capture: A Comprehensive Review," *C-Journal Carbon Res.*, vol. 9, no. 1, 2023.
- [2] E. Daneshvar, R. J. Wicker, P. L. Show, and A. Bhatnagar, "Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization – A review," *Chem. Eng. J.*, vol. 427, no. June 2021, 2022.
- [3] E. A. Burgueno Salas, "Gráfico: 2023, el año más caliente | Statista." [Online]. Available: <https://es.statista.com/grafico/31685/el-ano-mas-calido-en-la-historia/>. [Accessed: 07-Nov-2024].
- [4] I. Tiseo, "Monthly atmospheric CO₂ concentration 2024 | Statista." [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1091999/atmospheric-concentration-of-co2-historic/>. [Accessed: 07-Nov-2024].
- [5] L. J. R. Nunes, "The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies," *Environ. - MDPI*, vol. 10, no. 4, 2023.
- [6] E. S. J. Thoré, K. Muylaert, M. G. Bertram, and T. Brodin, "Microalgae," *Curr. Biol.*, vol. 33, no. 3, pp. R91–R95, 2023.
- [7] A. T. Hoang et al., "Biofuel production from microalgae: challenges and chances," *Phytochem. Rev.* 2022 224, vol. 22, no. 4, pp. 1089–1126, May 2022.
- [8] A. Y. Ugya, Y. Sheng, H. Chen, and Q. Wang, "Microalgal bioengineering: A futuristic tool for carbon capture," *Results Eng.*, vol. 24, no. August, p. 102990, 2024.
- [9] S. Abdur Razzak et al., "Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future," *Green Chem. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 418–439, 2024.
- [10] M. Guamán and N. Gonzáles, "Catálogo de microalgas y cianobacterias de agua dulce del Ecuador, Corporación para la Investigación Energética.," 2016.
- [11] C. Posten and C. Walter, "Microalgal biotechnology: Potential and production," *Microalgal Biotechnol. Potential Prod.*, pp. 1–266, Dec. 2012.
- [12] K. Gorla, H. M. Singh, A. Singh, R. Kothari, and V. V. Tyagi, "Insights into biohydrogen production from algal biomass: Challenges, recent advancements and future directions," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 127–151, Jan. 2024.
- [13] A. Richmond, *Handbook of Microalgal Culture*. 2004.
- [14] L. Barsanti and P. Gualtieri, *ALGAE: ANATOMY, BIOCHEMISTRY, AND BIOTECHNOLOGY: SECOND EDITION*. CRC Press, 2014.
- [15] M. Chen, Y. Chen, and Q. Zhang, "Assessing global carbon sequestration and bioenergy potential from microalgae cultivation on marginal lands leveraging machine learning," *Sci. Total Environ.*, vol. 948, p. 174462, Oct. 2024.

- [16] M. A. Borowitzka and N. R. Moheimani, *Algae for biofuels and energy*. Springer Netherlands, 2013.
- [17] R. Andersen, *Algal Culturing Techniques*, 1st ed. 2004.
- [18] Á. Hoyo Sánchez, J. L. Guzmán Sánchez, J. C. Moreno Úbeda, and A. Baños Torrico, “Control robusto del pH en un fotobiorreactor raceway,” *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 19, no. 3, pp. 274–283, 2022.
- [19] M. A. Alam and Z. Wang, “Microalgae biotechnology for development of biofuel and wastewater treatment,” *Microalgae Biotechnol. Dev. Biofuel Wastewater Treat.*, pp. 1–655, Apr. 2019.
- [20] uDOCz, “CICLO DE CALVIN | Marcela | uDocz.” [Online]. Available: <https://www.udocz.com/apuntes/89982/ciclo-de-calvin-1>. [Accessed: 09-Jan-2025].
- [21] D. Puppán, “Environmental evaluation of biofuels,” *Period. Polytech. Soc. Manag. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 95–116, 2002.
- [22] A. Giwa et al., “Techno-economic assessment of the sustainability of an integrated biorefinery from microalgae and *Jatropha*: A review and case study,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, no. February 2017, pp. 239–257, 2018.
- [23] S. Jha et al., “Recent aspects of algal biomass for sustainable fuel production: a review,” *Discov. Sustain.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [24] M. Dębowski, M. Zieliński, J. Kazimierowicz, N. Kujawska, and S. Talbierz, “Microalgae cultivation technologies as an opportunity for bioenergetic system development—advantages and limitations,” *Sustain.*, vol. 12, no. 23, pp. 1–37, 2020.
- [25] E. D. Arguelles and M. R. Martinez-Goss, “Lipid accumulation and profiling in microalgae *Chlorolobion* sp. (BIOTECH 4031) and *Chlorella* sp. (BIOTECH 4026) during nitrogen starvation for biodiesel production,” *J. Appl. Phycol.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–11, Feb. 2021.
- [26] M. Roy and K. Mohanty, “Valorization of de-oiled microalgal biomass as a carbon-based heterogeneous catalyst for a sustainable biodiesel production,” *Bioresour. Technol.*, vol. 337, p. 125424, Oct. 2021.
- [27] M. Arias Peñaranda, A. Martines Roldan, and R. Cañizares Villanueva, “Biodiesel Production from Microalgae: Cultivation Parameters that Affect Lipid Production,” *Acta Biol. Colomb.*, vol. 18, no. 2013, pp. 43–68, 2013.
- [28] J. Maroušek, A. Maroušková, B. Gavurová, D. Tuřek, and O. Strunecký, “Competitive algae biodiesel depends on advances in mass algae cultivation,” *Bioresour. Technol.*, vol. 374, p. 128802, Apr. 2023.

- [29] Y. Wang, H. Yang, X. Zhang, F. Han, W. Tu, and W. Yang, "Microalgal Hydrogen Production," *Small Methods*, vol. 4, no. 3, p. 1900514, Mar. 2020.
- [30] A. Ghimire et al., "Bio-hythane production from microalgae biomass: Key challenges and potential opportunities for algal bio-refineries," *Bioresour. Technol.*, vol. 241, pp. 525–536, 2017.
- [31] S. Sahota, S. Kumar, and L. Lombardi, "Biohythane, Biogas, and Biohydrogen Production from Food Waste: Recent Advancements, Technical Bottlenecks, and Prospects," *Energies* 2024, Vol. 17, Page 666, vol. 17, no. 3, p. 666, Jan. 2024.
- [32] R. Schellekens and G. Bieleman, "Bio Hythane," 2020.
- [33] H. M. Singh, R. Kothari, R. Gupta, and V. V. Tyagi, "Bio-fixation of flue gas from thermal power plants with algal biomass: Overview and research perspectives," *J. Environ. Manage.*, vol. 245, no. December 2018, pp. 519–539, 2019.
- [34] I. Haq and A. S. Kalamdhad, "Emerging Treatment Technologies for Waste Management," *Emerg. Treat. Technol. Waste Manag.*, pp. 1–257, 2021.
- [35] Teregroup, "Chlorella - Impianti per microalge." [Online]. Available: <https://www.teregroup.it/en/chlorella/>. [Accessed: 11-Nov-2024].
- [36] M. Anjos, B. D. Fernandes, A. A. Vicente, J. A. Teixeira, and G. Dragone, "Optimization of CO₂ bio-mitigation by *Chlorella vulgaris*," *Bioresour. Technol.*, vol. 139, pp. 149–154, 2013.
- [37] J. Li et al., "The regulating mechanisms of CO₂ fixation and carbon allocations of two *Chlorella* sp. strains in response to high CO₂ levels," *Chemosphere*, vol. 247, p. 125814, 2020.
- [38] S. Kumari, S. Satapathy, M. Datta, and S. Kumar, "Adaptation of Microalgae to Temperature and Light Stress," *Adv. Sci. Technol. Innov.*, pp. 123–134, 2022.
- [39] R.-C. L, R.-C. M, O.-L. C, and G.-A. R, "Evaluation of the operational conditions in the production and morphology of *Chlorella* sp.," vol. 81, no. 1, pp. 202–209, 2021.
- [40] L. Gómez, L. Tormos, and Y. Ortega, "Cultivo y aplicaciones de *Chlorella vulgaris*: principales tendencias y potencialidades en la agricultura," *Tecnol. Química*, vol. 42, no. 1, pp. 70–93, 2022.
- [41] E. M. Valdovinos-García, Juan Barajas-Fernández, María de los Ángeles Olán-Acosta, Moisés Abraham Petriz-Prieto, Adriana Guzmán-López, and Micael Gerardo Bravo-Sánchez, "Techno-Economic Study of CO₂ Capture of a Thermoelectric Plant Using Microalgae (*Chlorella*)," *Energies*, vol. 13, no. 2, pp. 1–19, 2020.
- [42] P. Zhang, Q. Sun, Y. Dong, and S. Lian, "Effects of different bicarbonate on spirulina in CO₂ absorption and microalgae conversion hybrid system," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 10, no. January, pp. 1–7, 2023.

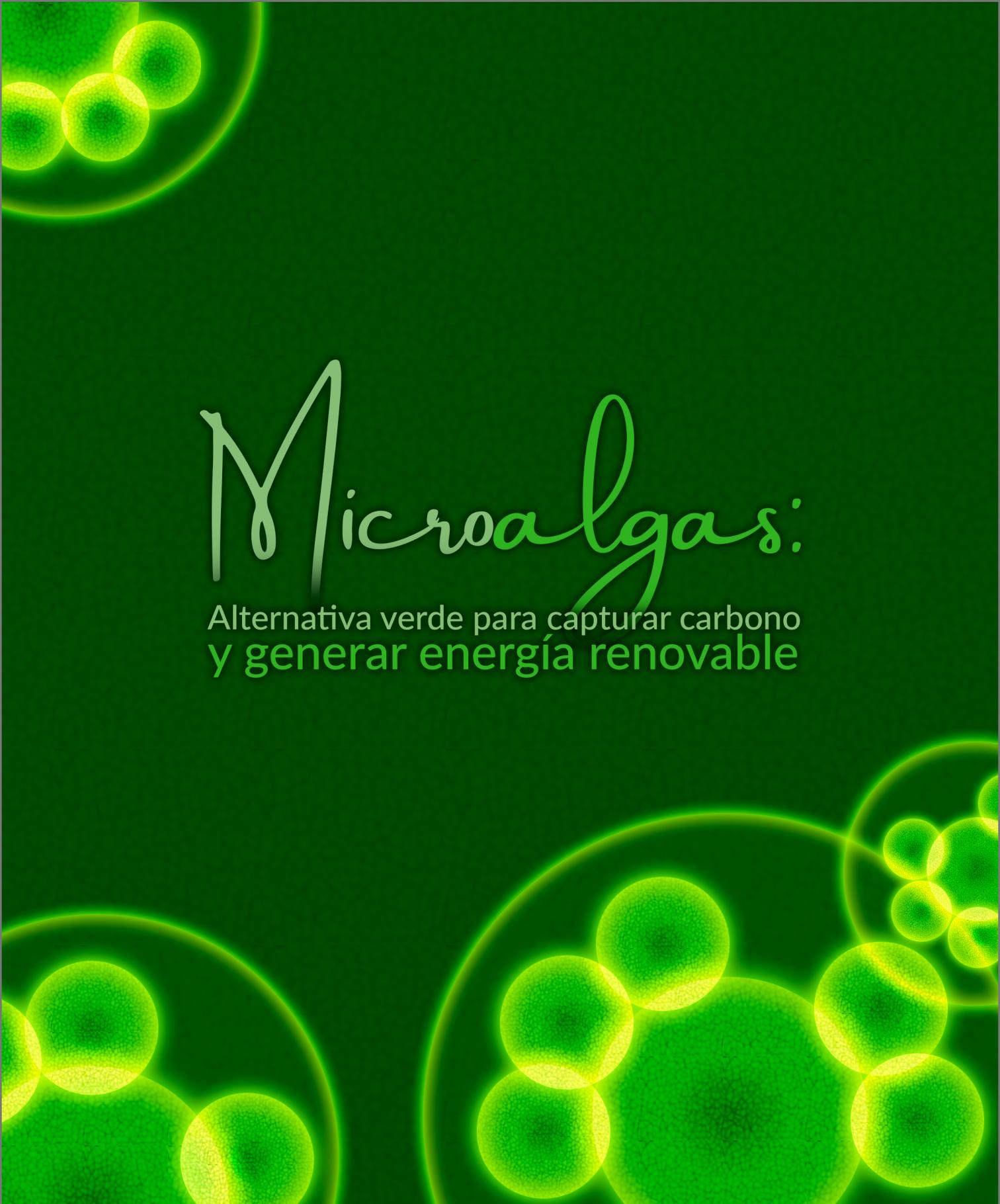
- [43] C. A. Arroyo, J. L. Contreras, B. Zeifert, and C. C. Ramírez, “CO₂ capture of the gas emission, using a catalytic converter and airlift bioreactors with the microalga *Scenedesmus dimorphus*,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 16, 2019.
- [44] M. Adamczyk, J. Lasek, and A. Skawińska, “CO₂ Biofixation and Growth Kinetics of *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis gaditana*,” *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 179, no. 7, pp. 1248–1261, 2016.
- [45] T. Iglina, P. Iglin, and D. Pashchenko, “Industrial CO₂ Capture by Algae: A Review and Recent Advances,” *Sustain.*, vol. 14, no. 7, 2022.
- [46] Klipartz, “Suplemento dietético espirulina bacterias azul-verde algas microscopio, jugos, técnica, nutrición, superalimento png | Klipartz.” [Online]. Available: <https://www.klipartz.com/es/sticker-png-fxdaw>. [Accessed: 12-Nov-2024].
- [47] T. L. Pham and M. H. Bui, “Removal of Nutrients from Fertilizer Plant Wastewater Using *Scenedesmus* sp.: Formation of Bioflocculation and Enhancement of Removal Efficiency,” *J. Chem.*, vol. 2020, 2020.
- [48] K. M. Palanisamy et al., “Lipid Enhancement in Oleaginous *Nannochloropsis* sp. under Nitrate Limitation for Future Bioenergy Production,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 2023, 2023.
- [49] D. Singh, K. Yadav, Deepshikha, and R. S. Singh, “Biofixation of carbon dioxide using mixed culture of microalgae,” *IJBT Vol.14(2) [April 2015]*, vol. 14, pp. 228–232, 2015.
- [50] S. K. Jayaraman and R. R. Rhinehart, “Modeling and optimization of algae growth,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 54, no. 33, pp. 8063–8071, Aug. 2015.
- [51] B. L. Gatamaneni, V. Orsat, and M. Lefsrud, “Factors Affecting Growth of Various Microalgal Species,” <https://home.liebertpub.com/ees>, vol. 35, no. 10, pp. 1037–1048, Oct. 2018.
- [52] N. S. Adenan, F. M. Yusoff, and M. Shariff, “Effect of salinity and temperature on the growth of diatoms and green algae,” *J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 397–404, 2013.
- [53] S. Chinnasamy, B. Ramakrishnan, A. Bhatnagar, and K. C. Das, “Biomass production potential of a wastewater alga *Chlorella vulgaris* ARC 1 under elevated levels of CO₂ and temperature,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 518–532, Feb. 2009.
- [54] P. Pachiappan et al., “Isolation and culture of microalgae,” *Adv. Mar. Brac. Aquac.*, pp. 1–15, Jan. 2015.
- [55] K. Cassidy, “EVALUATING ALGAL GROWTH AT DIFFERENT TEMPERATURES,” *Theses Diss. Agric. Eng.*, Jan. 2011.
- [56] S. Daliry, A. Hallajisani, J. Mohammadi Roshandeh, H. Nouri, and A. Golzary, “Investigation of optimal condition for *Chlorella vulgaris* microalgae growth,” *Glob. J. Environ. Sci. Manag.*, vol. 3, no. 2, pp. 217–230, Mar. 2017.

- [57] A. Kumar et al., “Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions,” *Trends Biotechnol.*, vol. 28, no. 7, pp. 371–380, Jul. 2010.
- [58] C. Yan, Y. Zhao, Z. Zheng, and X. Luo, “Effects of various LED light wavelengths and light intensity supply strategies on synthetic high-strength wastewater purification by *Chlorella vulgaris*,” *Biodegrad.* 2013 245, vol. 24, no. 5, pp. 721–732, Jan. 2013.
- [59] R. P. Rastogi, D. Madamvar, and A. Pandey, *Algal Green Chemistry, Recent Progress in Biotechnology*. 2017.
- [60] G. Naderi, M. O. Tade, and H. Znad, “Modified Photobioreactor for Biofixation of Carbon Dioxide by *Chlorella vulgaris* at Different Light Intensities,” *Chem. Eng. Technol.*, vol. 38, no. 8, pp. 1371–1379, Aug. 2015.
- [61] L. Blinová, A. Bartošová, and K. Gerulová, “Cultivation Of Microalgae (*Chlorella vulgaris*) For Biodiesel Production,” *Res. Pap. Fac. Mater. Sci. Technol. Slovak Univ. Technol.*, vol. 23, no. 36, pp. 87–95, Jun. 2015.
- [62] A. K. Sharma, A. Sharma, Y. Singh, and W. H. Chen, “Production of a sustainable fuel from microalgae *Chlorella minutissima* grown in a 1500 L open raceway ponds,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 149, p. 106073, Jun. 2021.
- [63] W. Kong, H. Song, Y. Cao, H. Yang, S. Hua, and C. Xia, “The characteristics of biomass production, lipid accumulation and chlorophyll biosynthesis of *Chlorella vulgaris* under mixotrophic cultivation,” *African J. Biotechnol.*, vol. 10, no. 55, pp. 11620–11630, 2011.
- [64] M. Ashour, A. T. Mansour, Y. A. Alkhamis, and M. Elshobary, “Usage of *Chlorella* and diverse microalgae for CO₂ capture - towards a bioenergy revolution,” *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 12, no. August, pp. 1–20, 2024.
- [65] A. K. Sharma, P. K. Sahoo, S. Singhal, and A. Patel, “Impact of various media and organic carbon sources on biofuel production potential from *Chlorella* spp.,” *3 Biotech*, vol. 6, no. 2, pp. 1–12, 2016.
- [66] V. Makarevičienė, V. Andrulevičiute, V. Skorupskaite, and J. Kasperovičienė, “Cultivation of Microalgae *Chlorella* sp. and *Scenedesmus* sp. as a Potential Biofuel Feedstock | Request PDF,” 2011.
- [67] M. A. Chia, A. T. Lombardi, and M. da G. G. Melão, “Growth and biochemical composition of *Chlorella vulgaris* in different growth media,” *An. Acad. Bras. Cienc.*, vol. 85, no. 4, pp. 1427–1438, 2013.
- [68] H. J. Ryu, K. K. Oh, and Y. S. Kim, “Optimization of the influential factors for the improvement of CO₂ utilization efficiency and CO₂ mass transfer rate,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 15, no. 4, pp. 471–475, Jul. 2009.

- [69] S. Velásquez and A. Ulate, “Diseño, construcción y puesta en marcha de un fotobiorreactor tubular para producir la microalga *Chlorella* sp,” *Cienc. y Tecnol.*, vol. 30, no. 1, pp. 28–49, 2014.
- [70] C. Contreras-Flores, J. M. Peña-Castro, L. B. Flores-Cotera, and R. O. Cañizares-Villanueva, “Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas,” *Interciencia*, vol. 28, no. 8, p. 450–456+488, 2003.
- [71] C. C. Flores, J. M. Peña-Castro, L. B. Flores-Cotera, and R. O. Cañizares-Villanueva, “Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas,” *Interciencia*, vol. 28, no. 8, pp. 450–456, 2003.
- [72] F. G. Acién Fernández, J. M. Fernández Sevilla, J. A. Sánchez Pérez, E. Molina Grima, and Y. Chisti, “Airlift-driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: Assessment of design and performance,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 56, no. 8, pp. 2721–2732, 2001.
- [73] V. Sanz, “Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes,” 2019.
- [74] P. Ham, S. Bun, P. Painmanakul, and K. Wongwailikhit, “Effective analysis of different gas diffusers on bubble hydrodynamics in bubble column and airlift reactors towards mass transfer enhancement,” *Processes*, vol. 9, no. 10, 2021.
- [75] Mundo Riego, “El efecto Venturi,” 2025. [Online]. Available: <http://www.novaalquimia.net/2018/12/el-efecto-venturi-y-su-relacion-con-los.html>.
- [76] Wikipedia, “Diagramma di Moody - Wikipedia,” 2024. .
- [77] C. R. Devgoswami, M. C. Kalita, J. Talukdar, R. Bora, and P. Sharma, “Studies on the growth behavior of *Chlorella*, *Haematococcus* and *Scenedesmus* sp. in culture media with different concentrations of sodium bicarbonate and carbon dioxide gas,” *African J. Biotechnol.*, vol. 10, no. 61, pp. 13128–13138, 2011.
- [78] W. Klinthong, Y. H. Yang, C. H. Huang, and C. S. Tan, “A Review: Microalgae and their applications in CO₂ capture and renewable energy,” *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 15, no. 2, pp. 712–742, 2015.
- [79] A. Arun et al., “Impact of Flue Gas Compounds on Microalgae and Mechanisms for Carbon Assimilation and Utilization,” *ChemSusChem*, p. 27, 2017.
- [80] D. van der Ha, B. Bundervoet, W. Verstraete, and N. Boon, “A sustainable, carbon neutral methane oxidation by a partnership of methane oxidizing communities and microalgae,” *Water Res.*, vol. 45, no. 9, pp. 2845–2854, Apr. 2011.
- [81] I. Prieto Márquez, C. Elena, and B. Alías, “ESTUDIO DEL CRECIMIENTO DE LA MICROALGA *Chlorella vulgaris* Y SU CAPACIDAD DE DEPURACIÓN DE AGUA RESIDUAL.”



- [82] S. M. Z. Hossain, M. M. Hossain, and S. A. Razzak, "Optimization of CO₂ Biofixation by *Chlorella vulgaris* Using a Tubular Photobioreactor," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 41, no. 7, pp. 1313–1323, Jul. 2018.
- [83] Instituto de Investigación Geológico y Energético - IIGE, "Portal web de Biomasa - Catálogo Virtual 3D," 2023. [Online]. Available: <http://bioenergiaecuador.geoenergia.gob.ec/biomasa/catalogo3d/>.
- [84] A. Maghzian, A. Aslani, and R. Zahedi, "Review on the direct air CO₂ capture by microalgae: Bibliographic mapping," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3337–3349, 2022.
- [85] A. M. Miranda, F. Hernandez-Tenorio, D. Ocampo, G. J. Vargas, and A. A. Sáez, "Trends on CO₂ Capture with Microalgae: A Bibliometric Analysis," *Molecules*, vol. 27, no. 15, pp. 1–14, 2022.

The background of the entire image is a dark green color. It is decorated with several clusters of glowing, spherical microalgae cells. These cells are depicted with a bright green outer ring and a darker green, textured interior, giving them a three-dimensional appearance. The clusters are scattered across the frame, with some in the top-left corner, some in the bottom-left, and a large group in the bottom-right.

Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable

Microalgas:

Alternativa verde para capturar carbono
y generar energía renovable



EL NUEVO
ECUADOR

Instituto de Investigación
Geológico y Energético



EMBAJADA
DE ESPAÑA
EN ECUADOR



Cooperación
Española

ISBN: 978-9942-7401-1-3



EL NUEVO
ECUADOR 

**Instituto de Investigación
Geológico y Energético**



@IIGEEcuador



@iige_ecuador



@IIGE_Ec

www.geoenergia.gob.ec