

Optimización de Condiciones Técnicas para el Cultivo de Microalgas Bajo Condiciones Controladas

Angie Nicolle Alvira González
Estudiante de Ingeniería Ambiental

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería, Ingeniería Ambiental
Profesora Lina María Chacón Rivera

Bogotá, Colombia

06 de Diciembre de 2024

Tabla de Contenido

Resumen	3
Palabras Clave:	3
Introducción	4
Objetivo General.....	7
Objetivos Específicos	7
Definición del problema.....	8
Análisis de Requerimientos.....	12
Marco Teórico	14
Análisis de Restricciones y Soluciones	24
Diseño Metodológico	29
Alternativas de Solución.....	31
Impactos Ambientales	34
Resultados y Análisis de Resultados.....	37
Conclusiones	47
Referencias	48

Resumen

El presente proyecto se enfoca en evaluar las condiciones técnicas óptimas para el cultivo de microalgas bajo condiciones controladas de laboratorio, enfocándose en los requerimientos específicos para su desarrollo eficiente y su potencial aplicación en entornos urbanos como Bogotá. Este estudio analiza factores críticos como temperatura, iluminación, aireación y nutrientes, que son esenciales para optimizar el crecimiento y rendimiento de las microalgas seleccionadas. Las microalgas, conocidas por su capacidad para absorber dióxido de carbono y adaptarse a diversas condiciones ambientales, representan una alternativa innovadora y sostenible para abordar desafíos relacionados con la urbanización y la sostenibilidad ambiental. A través de una metodología experimental, el proyecto busca caracterizar y establecer un protocolo técnico que detalla las mejores prácticas de cultivo, asegurando resultados replicables en sistemas controlados. Además, se presenta un análisis detallado de los costos asociados al desarrollo del proyecto, incluyendo equipos, insumos y procesos operativos, con el fin de proporcionar una visión clara sobre los recursos necesarios para implementar un sistema eficiente de cultivo. Este enfoque resulta particularmente relevante para ciudades como Bogotá, donde el crecimiento urbano y los desafíos ambientales exigen soluciones innovadoras y sostenibles. El enfoque del proyecto se limita a las condiciones de laboratorio, lo que permite un control riguroso de los parámetros de cultivo y garantiza resultados confiables que puedan ser utilizados como base para futuras aplicaciones a mayor escala. Esta iniciativa no solo busca generar conocimiento técnico y científico, sino también fomentar una perspectiva innovadora en el manejo de recursos naturales en contextos urbanos, destacando el papel crucial de las microalgas como aliadas estratégicas en la búsqueda de soluciones sostenibles.

Palabras Clave:

Microalgas, Cepas, Biorremediación, Fotobiorreactores, Contaminación, Biomasa.

Introducción

El crecimiento acelerado de las ciudades, como Bogotá, ha generado una presión significativa sobre los recursos naturales y la calidad ambiental, con desafíos relacionados con el manejo de la contaminación, el uso eficiente de los recursos y la implementación de soluciones sostenibles (ONU-Hábitat, 2022). En este contexto, las microalgas emergen como una herramienta biotecnológica prometedora debido a su capacidad para mitigar problemas ambientales a través de su alta eficiencia en la fijación de dióxido de carbono y la producción de biomasa rica en compuestos de alto valor agregado (Chisti, 2007). Este proyecto de investigación se centra en evaluar las condiciones técnicas óptimas para el cultivo de microalgas bajo condiciones controladas de laboratorio, proporcionando un marco que permita explorar su potencial aplicación en contextos urbanos como Bogotá.

Las microalgas son organismos fotosintéticos unicelulares con una elevada capacidad de crecimiento, incluso en condiciones adversas. Estas propiedades las convierten en candidatas ideales para aplicaciones en biorremediación, producción de biocombustibles, alimentos, productos farmacéuticos y cosméticos, entre otros (Pulz & Gross, 2004). No obstante, su cultivo eficiente requiere la optimización de variables clave como la temperatura, la iluminación, la composición de nutrientes y la aireación, los cuales afectan directamente su tasa de crecimiento y productividad (Razzak et al., 2013). Este proyecto tiene como objetivo establecer un protocolo técnico que contemple estas condiciones, con el fin de garantizar un desarrollo eficiente y sostenible del cultivo de microalgas en ambientes controlados.

Bogotá, una metrópoli ubicada a 2.600 metros sobre el nivel del mar y caracterizada por su clima frío y constante, representa un desafío particular para el cultivo de microalgas debido a sus condiciones atmosféricas únicas. Factores como la intensidad solar reducida y las temperaturas relativamente bajas pueden limitar el crecimiento de estos organismos (Bailey et al., 2014). Por esta razón, es fundamental llevar a cabo investigaciones que permitan determinar cómo las variables ambientales locales afectan su desarrollo y cuáles son los ajustes técnicos necesarios para garantizar su adaptación a estas condiciones.

Uno de los enfoques clave de esta investigación es identificar las especies de microalgas más adecuadas para ser cultivadas en Bogotá, seleccionando aquellas que demuestren una mayor capacidad de adaptación y productividad en condiciones específicas de laboratorio. Estudios previos han demostrado que especies como *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus*

obliquus presentan una alta resistencia a variaciones en la temperatura y una elevada eficiencia fotosintética, lo que las convierte en opciones viables para este tipo de proyectos (Kumar et al., 2015). Además, se busca establecer parámetros técnicos detallados, como la intensidad lumínica óptima y la concentración de nutrientes, necesarios para maximizar el rendimiento de las microalgas seleccionadas.

El diseño experimental contempla la evaluación sistemática de variables críticas para el cultivo, como la temperatura y la iluminación. La temperatura, por ejemplo, es un factor determinante que afecta la tasa metabólica y el crecimiento celular de las microalgas, siendo necesario definir un rango óptimo que permita su desarrollo eficiente (Grobbelaar, 2009). De manera similar, la iluminación juega un papel crucial, ya que las microalgas dependen de la luz para llevar a cabo la fotosíntesis. Sin embargo, una intensidad lumínica excesiva puede generar fotoinhibición, mientras que niveles insuficientes limitan su crecimiento (Chen et al., 2011). Este proyecto busca establecer las condiciones ideales para estos factores mediante experimentos controlados que proporcionen datos sólidos y replicables.

Además de los aspectos técnicos, el proyecto aborda un análisis detallado de los costos asociados al cultivo de microalgas en condiciones de laboratorio. Este análisis incluye la adquisición de equipos, insumos químicos, energía eléctrica y otros recursos necesarios para el mantenimiento del cultivo. Aunque no se evalúa la viabilidad económica a gran escala, la información recopilada proporciona una base clara sobre los recursos necesarios y los costos involucrados, lo que resulta fundamental para planificar futuras aplicaciones del cultivo de microalgas en contextos urbanos.

A nivel global, el interés por el cultivo de microalgas ha crecido exponencialmente debido a su potencial para contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en lo relacionado con la acción climática, el uso sostenible de los recursos y la innovación tecnológica (FAO, 2020). Este proyecto busca alinear sus objetivos con estas metas globales, promoviendo la investigación y el desarrollo de tecnologías biológicas que puedan ser adaptadas a las necesidades y condiciones específicas de Bogotá. Al centrarse en un entorno controlado de laboratorio, se garantiza un enfoque preciso y riguroso que permita generar conocimiento técnico sólido para futuras escalas piloto e industriales.

El cultivo de microalgas en ambientes urbanos representa una oportunidad única para combinar innovación biotecnológica con sostenibilidad. En ciudades como Bogotá, donde la calidad del aire y el manejo de los recursos son temas críticos, las microalgas pueden ofrecer soluciones prácticas y escalables. Por ejemplo, al integrarlas en sistemas urbanos, como techos verdes o biopaneles, no solo se podrían mejorar las condiciones ambientales, sino también generar biomasa utilizable en diferentes industrias (Norsker et al., 2011). Aunque este proyecto se limita al análisis en condiciones de laboratorio, sienta las bases para investigaciones futuras que exploren estas aplicaciones en entornos reales.

Finalmente, la relevancia de este proyecto radica en su capacidad para abordar problemas contemporáneos de sostenibilidad desde una perspectiva científica y técnica. Al optimizar las condiciones para el cultivo de microalgas, se busca no solo maximizar su eficiencia, sino también proporcionar una solución replicable que pueda adaptarse a las necesidades de otras ciudades con características similares. Bogotá, con su contexto único, ofrece un escenario ideal para explorar el potencial de las microalgas como una herramienta biotecnológica para el desarrollo sostenible.).

Objetivo General

Evaluar las condiciones técnicas óptimas para el cultivo de microalgas bajo condiciones controladas de laboratorio, considerando los requerimientos específicos para su desarrollo eficiente y su potencial aplicación en entornos urbanos como Bogotá, presentando de manera detallada los costos asociados al proyecto.

Objetivos Específicos

- ✓ Identificar las condiciones ambientales óptimas en laboratorio para el cultivo eficiente de microalgas, incluyendo variables como temperatura, iluminación, aireación y composición del medio de cultivo.
- ✓ Determinar las condiciones térmicas y de iluminación más efectivas en laboratorio para maximizar el crecimiento y la productividad de las cepas de microalgas seleccionadas.
- ✓ Establecer un protocolo técnico detallado para el cultivo de microalgas en laboratorio, que incluya requerimientos específicos de nutrientes, aireación y manejo del cultivo.
- ✓ Realizar un análisis económico del proyecto, incluyendo los costos asociados al diseño, implementación y mantenimiento del cultivo de microalgas en condiciones de laboratorio.

Definición del problema

El cultivo de microalgas representa una oportunidad significativa en la búsqueda de soluciones biotecnológicas sostenibles, particularmente en entornos urbanos como Bogotá. Sin embargo, su implementación efectiva enfrenta múltiples desafíos relacionados con las condiciones ambientales locales, los requerimientos técnicos específicos y los costos asociados al desarrollo del cultivo en laboratorio. A pesar de los avances en investigación, aún existen lagunas en el conocimiento sobre las condiciones óptimas necesarias para maximizar el rendimiento de las microalgas en entornos controlados, limitando su aplicación práctica y escalabilidad. Este proyecto aborda estas brechas, proporcionando un marco técnico que busca establecer protocolos específicos para el cultivo eficiente de microalgas adaptadas a las características de Bogotá, un entorno urbano complejo.

El problema se fundamenta en la necesidad de identificar y optimizar las condiciones ambientales necesarias para el crecimiento eficiente de las microalgas bajo parámetros controlados. Factores como la temperatura, la intensidad y longitud de onda de la iluminación, la composición de nutrientes, y los sistemas de aireación son variables críticas que influyen directamente en la productividad del cultivo (Bailey et al., 2014). En ciudades como Bogotá, donde el clima predominante incluye bajas temperaturas y niveles reducidos de radiación solar, estas variables presentan limitaciones específicas que requieren ajustes y soluciones adaptadas a las condiciones locales.

El desarrollo de cultivos de microalgas ha demostrado ser una herramienta eficaz en la producción de biomasa y productos de valor agregado, como biocombustibles, alimentos y compuestos bioactivos (Chisti, 2007). Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados se enfocan en condiciones ideales de laboratorio que no siempre reflejan las realidades de un entorno urbano. Esta desconexión subraya la importancia de desarrollar investigaciones que no solo analicen las condiciones ideales, sino que también evalúen la adaptabilidad de las microalgas a parámetros locales como los de Bogotá, optimizando así su desarrollo sostenible en estos contextos.

Un aspecto clave del problema radica en la falta de protocolos estandarizados que puedan ser replicados y aplicados en investigaciones futuras. Actualmente, la literatura científica muestra una amplia variabilidad en los métodos y resultados relacionados con el cultivo de microalgas, lo que dificulta la comparación entre estudios y limita la generación de conclusiones

consistentes (Kumar et al., 2015). La estandarización de parámetros como la concentración de nutrientes, la intensidad lumínica y las técnicas de aireación es crucial para garantizar la reproducibilidad de los resultados y la viabilidad de los cultivos a largo plazo.

Desde una perspectiva técnica, la falta de claridad sobre las condiciones óptimas para el cultivo de microalgas también implica un riesgo de ineficiencia en el uso de recursos. Los sistemas de cultivo mal ajustados pueden generar altos costos operativos y un rendimiento reducido, comprometiendo la sostenibilidad económica del proceso (Norsker et al., 2011). Aunque este proyecto no evalúa directamente la viabilidad económica del cultivo a gran escala, sí detalla los costos asociados al desarrollo y mantenimiento del sistema en condiciones controladas de laboratorio. Este análisis es esencial para identificar áreas de mejora que permitan optimizar los recursos disponibles.

En el contexto de Bogotá, la relevancia del problema se magnifica por las características ambientales de la ciudad. Con una altitud de 2.640 metros sobre el nivel del mar, temperaturas promedio de 14 °C y variaciones significativas en la radiación solar, las condiciones climáticas presentan retos únicos para el cultivo de microalgas (IDEAM, 2022). Estas limitaciones subrayan la importancia de desarrollar soluciones adaptadas que maximicen el rendimiento del cultivo a pesar de las condiciones adversas. Además, las restricciones de espacio y la densidad poblacional de la ciudad destacan la necesidad de sistemas compactos y eficientes que puedan ser implementados en áreas urbanas densamente habitadas.

El problema también tiene implicaciones económicas. Los costos asociados al cultivo de microalgas incluyen la adquisición de insumos químicos, la energía necesaria para la iluminación y la aireación, y el mantenimiento de las condiciones controladas del laboratorio (Pulz & Gross, 2004). En muchos casos, estos costos representan una barrera significativa para la implementación de sistemas a mayor escala. Por lo tanto, este proyecto busca no solo optimizar las condiciones técnicas del cultivo, sino también detallar los costos involucrados, proporcionando una visión integral que permita evaluar la viabilidad del proceso en el contexto específico de Bogotá.

La delimitación del problema se centra en un entorno controlado de laboratorio, lo que permite minimizar las incertidumbres asociadas con variables externas y garantizar la precisión de los datos obtenidos. Este enfoque también facilita el análisis detallado de variables específicas, como la temperatura y la iluminación, asegurando que los resultados sean

reproducibles y aplicables en contextos similares. Además, al limitarse al cultivo de microalgas bajo condiciones controladas, el proyecto establece un marco claro y manejable que sirve como base para futuras investigaciones en entornos más complejos.

La investigación busca responder preguntas clave, como: ¿Cuáles son las condiciones térmicas y de iluminación ideales para maximizar el crecimiento de microalgas seleccionadas en Bogotá? ¿Qué proporciones de nutrientes y sistemas de aireación son necesarios para garantizar su desarrollo eficiente? ¿Qué costos están asociados con la implementación y mantenimiento de un sistema de cultivo de microalgas en laboratorio? Estas interrogantes están diseñadas para generar información que permita establecer una base sólida para futuras aplicaciones a mayor escala, proporcionando un marco técnico y económico adaptado al contexto urbano de Bogotá.

En síntesis, el problema abordado por este proyecto se centra en la necesidad de optimizar las condiciones técnicas para el cultivo de microalgas en laboratorio, adaptándose a las características específicas de Bogotá. Al proporcionar un análisis detallado de las variables críticas y los costos asociados, el proyecto no solo avanza en el conocimiento científico, sino que también establece una base sólida para la implementación de tecnologías biológicas sostenibles en entornos urbanos.

Justificación

El cultivo de microalgas en condiciones controladas ha emergido como una solución biotecnológica innovadora con aplicaciones potenciales en múltiples áreas, incluyendo la producción de biomasa, compuestos bioactivos y biocombustibles (Chisti, 2007). Sin embargo, el desarrollo eficiente de estas tecnologías requiere de un entendimiento detallado de los parámetros técnicos óptimos que garanticen la sostenibilidad y escalabilidad del cultivo en entornos urbanos. En ciudades como Bogotá, caracterizadas por condiciones climáticas específicas como bajas temperaturas y variabilidad en la intensidad lumínica, es fundamental investigar las adaptaciones necesarias para maximizar la eficiencia de estos cultivos en laboratorio y, eventualmente, en aplicaciones urbanas más amplias.

La relevancia de este proyecto radica en abordar una brecha significativa en el conocimiento técnico relacionado con las condiciones ideales para el cultivo de microalgas bajo parámetros controlados. Aunque la literatura existente ha documentado ampliamente los beneficios potenciales de las microalgas aún persisten desafíos asociados a su implementación en contextos locales como Bogotá, donde factores ambientales y limitaciones de infraestructura influyen directamente en el rendimiento del cultivo (Bailey et al., 2014).

Este estudio tiene un valor particular al centrarse en la optimización técnica y en la identificación de los costos asociados al cultivo de microalgas. Al proporcionar datos precisos y replicables sobre parámetros como temperatura, iluminación y requerimientos de nutrientes, se busca establecer un marco de referencia que facilite futuras investigaciones y proyectos en el ámbito biotecnológico. Asimismo, los resultados pueden servir como base para políticas públicas orientadas a fomentar tecnologías sostenibles que utilicen recursos biológicos locales de manera eficiente.

Desde una perspectiva académica, este proyecto contribuye al fortalecimiento del conocimiento en biotecnología aplicada, proporcionando un protocolo técnico detallado que puede ser adaptado y escalado a otros entornos urbanos con características similares.

Análisis de Requerimientos

Para asegurar el éxito del proyecto y cumplir con los objetivos propuestos, la verificación de los parámetros de diseño será un proceso fundamental. Se implementarán diferentes medidas para garantizar que todas las condiciones necesarias para el crecimiento y funcionamiento de las microalgas sean controladas y monitoreadas adecuadamente. A continuación, se detallan los elementos clave a considerar:

- ✓ **Capacitaciones:** Es fundamental recibir capacitaciones especializadas de expertos en biotecnología y manejo de microalgas. Estas sesiones abarcarán protocolos de bioseguridad, técnicas avanzadas de cultivo, y mantenimiento de los sistemas de cultivo. Además, se incluirá formación en el manejo de herramientas de monitoreo y control, garantizando que el equipo de investigación esté preparado para operar los sistemas de laboratorio con precisión y eficiencia.
- ✓ **Obtención de Cepas:** La selección de cepas de microalgas será prioritaria y se realizará a través de bancos de algas certificados o instituciones especializadas. Se priorizarán aquellas especies que demuestren alta adaptabilidad a las condiciones de laboratorio y eficiencia en el crecimiento bajo condiciones controladas. Cepas como *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* serán consideradas debido a su robustez y productividad reportada en estudios previos (Bailey et al., 2014).
- ✓ **Medios de Cultivo:** El desarrollo de medios de cultivo adecuados será crítico para garantizar el crecimiento eficiente de las microalgas. Se seleccionarán y ajustarán los nutrientes, asegurando que estos cumplan con las necesidades metabólicas específicas de las cepas. Además, se realizarán pruebas experimentales para evaluar el desempeño de diferentes composiciones de medios bajo condiciones controladas.
- ✓ **Requerimientos Técnicos**
 - **Aireación:** Los sistemas de aireación garantizarán un flujo constante de oxígeno y dióxido de carbono, optimizando el metabolismo fotosintético de las microalgas. Los difusores de aire serán calibrados para mantener una distribución uniforme en el medio de cultivo.
 - **Iluminación:** La iluminación será un factor clave. Se evaluarán fuentes LED ajustadas en longitud de onda e intensidad para simular las condiciones óptimas

de luz para la fotosíntesis, considerando rangos lumínicos entre 400 y 700 nm (Tredici, 2010).

- **Temperatura:** Se controlará mediante resistencias programables en los reservorios, manteniendo rangos entre 20 y 25 °C, dependiendo de los requisitos específicos de las microalgas.
- ✓ **Monitoreo de Parámetros:** El monitoreo continuo será esencial para garantizar que las condiciones experimentales cumplan con los estándares requeridos:
- **Concentración de Biomasa:** Se utilizarán densímetros ópticos para medir la densidad celular, asegurando un crecimiento constante y evaluando la tasa de reproducción.
 - **pH:** Se instalarán sensores de pH para mantener niveles entre 7 y 8, rango ideal para maximizar la actividad metabólica de las microalgas.
 - **Temperatura:** Sensores digitales monitorearán la estabilidad térmica de los cultivos, asegurando que se mantenga dentro de los rangos óptimos establecidos.
- ✓ **Costos del Proyecto:** Se detallarán los costos asociados a cada componente del sistema, incluidos equipos, medios de cultivo, cepas y materiales consumibles. Este desglose permitirá una evaluación precisa de los recursos necesarios y la viabilidad económica del proyecto dentro del contexto de laboratorio.

Este enfoque detallado de verificación de los parámetros de diseño asegurará que cada aspecto técnico del proyecto esté optimizado, garantizando la máxima eficiencia en la remoción de contaminantes y la viabilidad del uso de microalgas para la remediación del aire en entornos urbanos.

Marco Teórico

1. Cultivo de Microalgas

Las microalgas son organismos fotosintéticos unicelulares con gran potencial biotecnológico debido a su versatilidad y capacidad para crecer en diversas condiciones ambientales. Su uso se ha extendido a múltiples áreas, como la producción de biocombustibles, alimentos funcionales, cosméticos, compuestos bioactivos y, especialmente, en la remediación ambiental. Este último enfoque ha cobrado relevancia debido a la creciente necesidad de soluciones sostenibles para mitigar el impacto de la actividad humana sobre el medio ambiente (Borowitzka, 2018).

El cultivo de microalgas, particularmente en entornos urbanos como Bogotá, presenta desafíos específicos relacionados con las condiciones climáticas locales, los requerimientos técnicos y los costos asociados. Las cepas seleccionadas para este proyecto, *Chlorella vulgaris*, *Anabaena inaequalis*, *Arthrospira maxima* (espirulina) y *Scenedesmus armatus*, han demostrado alta adaptabilidad y eficiencia en la fijación de dióxido de carbono (CO_2) y otros contaminantes atmosféricos. Este marco teórico explora los fundamentos del cultivo de estas especies, los medios adecuados para su crecimiento, las condiciones ambientales necesarias y su potencial para contribuir a la sostenibilidad ambiental en entornos urbanos.

1.1 Características Cepas Seleccionadas

- **Chlorella vulgaris:** *Chlorella vulgaris* es una microalga verde ampliamente estudiada y reconocida por su alta eficiencia fotosintética y su capacidad para acumular biomasa en cortos períodos de tiempo. Esto la hace ideal para aplicaciones ambientales e industriales. Su tolerancia a diversas condiciones climáticas y su capacidad para capturar dióxido de carbono (CO_2) han sido documentadas extensamente, lo que la convierte en una de las especies más utilizadas en procesos de remediación y producción sostenible (Hosseini et al., 2020). Estudios recientes han demostrado que *C. vulgaris* puede alcanzar tasas de fijación de CO_2 de hasta 1.8 g/L/día en condiciones óptimas, lo que la posiciona como una solución prometedora para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (Behera et al., 2020). Además, esta microalga presenta una alta adaptabilidad a entornos urbanos debido a su capacidad para crecer en

condiciones con fluctuaciones de temperatura y luz, lo que la hace especialmente adecuada para su cultivo en ciudades como Bogotá.

- **Anabaena inaequalis:** es una cianobacteria filamentosa conocida por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, una característica que le permite prosperar en ambientes pobres en nutrientes. Este rasgo, combinado con su capacidad para producir biomoléculas de alto valor agregado, como aminoácidos esenciales y vitaminas, la convierte en una opción ideal para aplicaciones biotecnológicas y ambientales (Rippka et al., 1979). Su eficiencia en la remediación de ambientes con altas concentraciones de nitratos la ha hecho objeto de múltiples investigaciones, destacándose su adaptabilidad a condiciones adversas, como fluctuaciones de pH y temperatura (Hernández-Morales et al., 2018). En estudios realizados en condiciones controladas, *A. inaequalis* ha demostrado una eficiencia de remoción de nitratos superior al 90%, consolidándola como una herramienta eficaz en procesos de tratamiento de aguas residuales y mejoramiento de calidad ambiental (Mahmoud et al., 2021).
- **Arthrospira maxima (Espirulina):** es una microalga cianobacteriana que destaca por su rápido crecimiento y su capacidad para capturar grandes cantidades de CO₂. Su resistencia a condiciones ambientales adversas, como altas concentraciones de sal y temperaturas extremas, la hace especialmente adecuada para aplicaciones en remediación ambiental y producción de biomasa (Vonshak, 2012). Además de su papel en la remediación de gases de efecto invernadero, *A. maxima* es una fuente rica en proteínas, lípidos y pigmentos como la ficocianina, lo que la convierte en un recurso valioso para aplicaciones industriales y alimentarias (Belay et al., 2013). En condiciones óptimas de cultivo, esta microalga puede alcanzar tasas de crecimiento específicas de hasta 0.6 d⁻¹ y tasas de fijación de CO₂ de 1.2 g/L/día, lo que refuerza su utilidad en proyectos de mitigación del cambio climático y generación de bioproductos (Pulz & Gross, 2004).
- **Scenedesmus armatus:** Scenedesmus armatus es una microalga verde reconocida por su robustez y tolerancia a altas concentraciones de contaminantes. Esta especie tiene una alta capacidad para acumular lípidos, lo que la hace ideal para aplicaciones de biorremediación y producción de biocombustibles (Mata et al., 2010). *S. armatus* ha demostrado ser eficaz en la eliminación simultánea de dióxido de carbono (CO₂) y

óxidos de nitrógeno (NO_x) de gases de combustión, con eficiencias de remoción que alcanzan el 87.7% para CO_2 y el 96.9% para NO (Cheng et al., 2006). Además, su capacidad para adaptarse a condiciones extremas de pH, temperatura y concentración de gases contaminantes la posiciona como una microalga versátil y de alto rendimiento en proyectos de remediación ambiental en entornos urbanos como Bogotá. En investigaciones recientes, *S. armatus* ha mostrado una tasa de crecimiento específica de 0.5 d^{-1} en medios de cultivo enriquecidos con dióxido de carbono, destacando su potencial para aplicaciones industriales y ambientales (Liang et al., 2013).

1.2 Medios de Cultivo

El cultivo exitoso de microalgas requiere medios de cultivo cuidadosamente formulados que proporcionen los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo óptimo de las especies seleccionadas. Cada medio de cultivo se elige en función de las características específicas de las microalgas y sus requerimientos nutricionales. En este proyecto, se emplearán dos medios estándar ampliamente reconocidos: el Bold Basal Medium (BBM) y el medio Zarrouk.

1.2.1 Medio BBM (Bold Basal Medium)

El medio BBM es uno de los medios de cultivo más utilizados en la investigación de microalgas verdes como *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus armatus*. Formulado inicialmente por Bold (1949), este medio proporciona una combinación equilibrada de nitratos, fosfatos y sulfatos, que son esenciales para el metabolismo celular y el crecimiento de estas microalgas (Bold, 1949; Bischoff & Bold, 1963).

- **Componentes principales:** Nitrato de sodio (fuente de nitrógeno), fosfato monopotásico (fuente de fósforo) y sulfato de magnesio (fuente de azufre). Además, contiene micronutrientes como calcio, hierro y manganeso, que son necesarios para las reacciones enzimáticas y la fotosíntesis.
- **Propiedades:** Este medio favorece un crecimiento estable y una alta producción de biomasa en condiciones de laboratorio. Su composición permite que las microalgas se adapten fácilmente a cambios controlados en pH, temperatura y luz.

- **Aplicaciones:** Se utiliza ampliamente para estudios de fijación de carbono y producción de biomasa, debido a su capacidad para promover un crecimiento uniforme en condiciones controladas (Borowitzka, 2018).

En este proyecto, el medio BBM será optimizado para *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus armatus*, asegurando que se satisfagan sus necesidades nutricionales específicas y promoviendo un crecimiento eficiente.

1.2.2 Medio Zarrouk

El medio Zarrouk, desarrollado específicamente para cianobacterias como *Arthrospira maxima* y *Anabaena inaequalis*, es una formulación enriquecida con altos niveles de bicarbonatos y carbonatos. Estos componentes son esenciales para la fijación eficiente de dióxido de carbono (CO₂) y el crecimiento celular, características propias de estas especies (Zarrouk, 1966).

- **Componentes principales:** Bicarbonato de sodio y carbonato de sodio (fuentes de carbono inorgánico), sulfato de magnesio, sulfato de potasio y fosfato monopotásico. Este medio también incluye trazas de hierro y otros micronutrientes.
- **Propiedades:** El medio Zarrouk es particularmente efectivo en cianobacterias debido a su capacidad para estabilizar el pH y proporcionar un entorno óptimo para la fotosíntesis. Además, facilita el almacenamiento intracelular de carbono y nitrógeno, esenciales para la producción de biomoléculas de alto valor agregado (Vonshak, 2012).
- **Aplicaciones:** Es ampliamente utilizado en la producción comercial de *Spirulina* debido a su efectividad en la promoción del crecimiento rápido y la alta productividad de biomasa. En el contexto de este proyecto, será optimizado para las condiciones específicas requeridas por *Arthrospira maxima* y *Anabaena inaequalis*, garantizando un entorno ideal para su desarrollo (Belay et al., 2013).

1.2.3 Condiciones Adicionales

El monitoreo constante de parámetros como pH, temperatura y concentración de nutrientes es esencial para mantener la estabilidad de los medios de cultivo y garantizar el crecimiento eficiente de las microalgas. El pH se ajustará inicialmente a valores entre 7 y 8, ideales para ambas formulaciones, y se controlará periódicamente para evitar fluctuaciones que

puedan afectar el metabolismo celular (Richmond, 2004). El éxito de este proyecto depende de la capacidad para ajustar estos medios a las condiciones específicas de laboratorio y optimizar su composición según las necesidades de las cepas seleccionadas. Estas adaptaciones garantizarán el máximo rendimiento en biomasa y productividad, sentando las bases para futuras aplicaciones en entornos urbanos como Bogotá.

1.3 Condiciones Ambientales

- **Iluminación:** Se emplearán lámparas LED con espectro blanco, con una intensidad lumínica de $150\text{-}200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, lo que asegura niveles óptimos para la fotosíntesis.
- **Temperatura:** Las cepas crecerán en un rango de $20\text{-}30^{\circ}\text{C}$, ajustado según la tolerancia específica de cada especie.
- **Aireación:** Se garantizará un suministro constante de CO_2 mediante sistemas de aireación que promuevan la mezcla del medio y la exposición uniforme al gas.
- **pH:** Se mantendrá en un rango de $6.5\text{-}7.5$ para *Chlorella* y *Scenedesmus*, y de $9\text{-}10$ para *Anabaena* y *Arthrospira*.

2. Soluciones Basadas en la Naturaleza

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) están diseñadas para abordar los principales desafíos que enfrenta la sociedad. Estas soluciones buscan responder a problemas críticos como la seguridad alimentaria, la adaptación y mitigación del cambio climático, la gestión y disponibilidad de recursos hídricos, la mejora de la salud pública, la reducción de riesgos ante desastres naturales y el fomento del desarrollo social y económico. Estas estrategias se fundamentan en el aprovechamiento sostenible de los ecosistemas y sus procesos naturales para ofrecer beneficios tanto ambientales como humanos (Fundación Conama, 2018).

Según un estudio realizado por el Departamento Nacional de Planeación en 2020, se ha demostrado que invertir en Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) resulta en una eficiencia significativa del gasto público, ya que, por cada dólar destinado a la conservación de cuencas hidrográficas, montañas y bosques, se generan entre 7 y 30 dólares en beneficios; además, la restauración de bosques y cuencas hidrográficas puede ahorrar más de 890 millones de dólares anuales en la gestión del agua.

Por esta razón, se proponen diversas acciones, tales como el tratamiento de aguas residuales, la implementación de iniciativas de ingeniería verde y arquitectura ecológica, y la restauración de ecosistemas que contribuyan a la regulación hídrica. También se busca fortalecer las capacidades de las entidades de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+I) en bioeconomía y bioproductos. Esto incluye fomentar la interacción entre nuevas bioempresas, universidades, centros de investigación y centros de innovación, con el objetivo de promover un desarrollo sostenible y eficiente desde el punto de vista económico y ambiental

2.1 Microalgas Como Agentes De Biorremediación

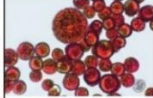


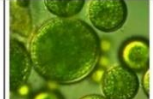
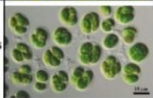
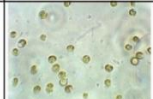


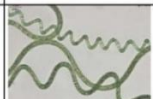
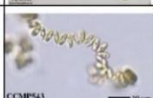
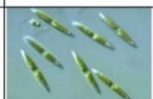

En 1890, el microbiólogo holandés Martinus Willem Beijerinck inició la investigación de las microalgas, introduciendo la noción de emplear estos cultivos como una herramienta para estudiar la fotosíntesis. Sus estudios demostraron que, bajo condiciones de cultivo apropiadas y particularmente en niveles óptimos de luz, las microalgas eran considerablemente más productivas que las plantas superiores o las células foto autotróficas aisladas de las mismas. Luego de esto, en la década de los 50 el ingeniero William J. Oswald, sugirió la utilización de cultivos masivos de microalgas para tratamiento de aguas residuales para que pueda utilizarse para riego (Abalde et al., 1995).

En la actualidad el uso de microalgas para biorremediación es considerado como una de las alternativas más convincentes debido a su potencial en la eliminación de contaminantes y nutrientes y por su adaptabilidad a diferentes climas y degradar componentes orgánicos (Ahmad et al, 2021). Además, en investigaciones que se realizaron hace una década se establece que para que las microalgas sean efectivas en la remediación, deben satisfacer varios requisitos: crecer rápidamente, resistir cambios estacionales y diurnos, tener la capacidad de agruparse para una fácil recolección por gravedad, y contener niveles elevados de componentes celulares de valor. (Hernández & Labbé, 2014).

En este contexto, se realizó una evaluación de microalgas en Colombia, incluyendo especies como *Chlorella* sp, *Scenedesmus* sp, *Coelastrum* sp, *Desmodesmus* sp y *Monoraphidium* sp, que muestran un alto potencial para la eliminación de contaminantes. Para el tratamiento de aire, se han identificado microalgas como *Chlorella vulgaris*, la cual tiene una eficiencia de eliminación de CO₂ inferior al 80%, con una tasa máxima de fijación de CO₂ obtenida a una concentración del 1,0% en el gas de aireación. *Scenedesmus obliquus* ha sido utilizada para la fijación de CO₂ en altas concentraciones (15%-35%) y ha mostrado una gran

adaptabilidad a diversas condiciones ambientales, siendo capaz de eliminar simultáneamente NO y CO₂ de gases de combustión simulados con una eficiencia de hasta el 96,9% para NO y el 87,7% para CO₂. Esta microalga demuestra una significativa tolerancia a condiciones extremas de pH, temperatura y concentración de gases contaminantes, lo que la hace altamente efectiva para la purificación del aire (Lihua Cheng, L. Z., 2006).

Tabla 2: Opciones de Microalgas endémicas de Colombia

Microalga	Función	% Remoción	Uso	Ubicación	Eficiencia
Haematococcus pluvialis 	Produce astaxantina. Elimina compuestos orgánicos.	80-90% compuestos orgánicos	Agua	Laguna de Neira, Laguna de La Tota, Laguna de Guatavita	Alta
Tetraselmis chuii 	Produce ácidos grasos EPA y DHA. Elimina compuestos orgánicos.	70-85% compuestos orgánicos	Agua	Ciénaga de Santa Marta, Ciénaga de Cholón, Ciénaga Grande de Santa Marta	Alta
Scenedesmus acutus 	Elimina CO ₂ , NO _x y metales pesados. Produce biomasa rica en proteínas y lípidos.	80-95% CO ₂ , 60-80% NO _x , 40-60% metales pesados	Aire y agua	Río Magdalena, Río Atrato, Laguna de Fúquene	Alta
Chlorella vulgaris 	Absorbe CO ₂ , SO ₂ y NO ₂ . Produce biomasa para biocombustible o alimento animal.	70-90% CO ₂ , 50-70% SO ₂ , 30-50% NO ₂	Aire y agua	Río Magdalena, Río Cauca, Ciénaga de Santa Marta	Alta
Chlamydomonas reinhardtii 	Elimina CO ₂ y NO _x . Modelo de laboratorio para fotosíntesis.	75-85% CO ₂ , 55-75% NO _x	Aire	Río Meta, Río Putumayo, Laguna de Guatavita	Alta
Isochrysis galbana 	Produce ácidos grasos omega-3. Elimina metales pesados.	60-80% metales pesados	Agua	Golfo de Tribugá, Golfo de Urabá, Islas del Rosario	Media
Nannochloropsis salina 	Produce carotenoides. Elimina metales pesados.	50-70% metales pesados	Agua	Bahía de Buenaventura, Bahía de Málaga, Isla de Providencia	Media
Dunaliella salina 	Produce betacaroteno. Elimina CO ₂ y SO ₂ .	50-70% CO ₂ , 30-50% SO ₂	Aire y agua	Ciénaga de Cholón, Ciénaga Grande de Santa Marta, Bahía de Cartagena	Media
Spirulina platensis 	Absorbe CO ₂ , SO ₂ y metales pesados. Alto valor nutricional.	60-80% CO ₂ , 40-60% SO ₂ , 20-40% metales pesados	Agua	Laguna de Tota, Laguna de Iguaque, Parque Nacional Natural Chingaza	Media
Navicula pelliculosa 	Elimina metales pesados y nutrientes.	50-70% metales pesados, 40-60% nutrientes	Agua	Río Magdalena, Río Cauca, Laguna de Fúquene	Media
Nitzschia palea 	Elimina metales pesados y compuestos orgánicos.	60-80% metales pesados, 50-70% compuestos orgánicos	Agua	Río Magdalena, Río Atrato, Laguna de Tota	Media
Cyclotella meneghiniana 	Elimina nutrientes y compuestos orgánicos.	40-60% nutrientes, 30-50% compuestos orgánicos	Agua	Río Meta, Río Putumayo, Laguna de Guatavita	Media

Fuente: Propia

2.2 Biorreactores

Los biorreactores se definen como recipientes en los que se llevan a cabo biorreacciones bajo condiciones controladas. Estos sistemas son de gran importancia ya que permiten identificar la velocidad de las reacciones biológicas, así como los balances de masa que implican reactivos y catalizadores (Panda & Tapobrata, 2011)

Tanto los biorreactores de laboratorio como los de planta piloto se emplean habitualmente para evaluar modificaciones propuestas en procesos de producción comercial, así como para analizar eventos y no conformidades. Además, es importante resaltar que estos sistemas ofrecen un ambiente favorable para el crecimiento de organismos en condiciones controladas, lo que facilita el seguimiento de los parámetros de reacción. Asimismo, posibilitan una distribución más eficiente de los reactivos junto con los biocatalizadores (Perry, 2019).

2.2.1 Diseño y Funcionamiento

El diseño de biorreactores debe garantizar un fácil montaje y aplicación, así como asegurar la uniformidad y una mayor área de contacto entre los componentes del sistema. Además, es crucial cumplir con condiciones óptimas para favorecer un crecimiento microbiano eficiente y la obtención del producto deseado. Asimismo, estos biorreactores deben contar con sistemas que permitan el control preciso de la temperatura y el pH, junto con mecanismos que faciliten la dispersión y la agitación (Moreno & Vanegas, 2017).

Ruíz et al. (2007) proporcionan consideraciones adicionales para el diseño de biorreactores, que incluyen: Minimización del consumo de energía, garantizar la esterilidad del tanque durante períodos prolongados para evitar la contaminación en operaciones de bioprocesos de larga duración, facilitación de la transferencia de calor entre el medio y las células, asegurando una temperatura estable para el óptimo crecimiento celular, incorporación de entradas para la adición de nutrientes.

Existen varios diseños de biorreactores que se pueden emplear a escala de laboratorio, entre los cuales se incluyen:

- ✓ **Columna estéril:** Este tipo de biorreactor permite el control de la humedad y la temperatura, además de contar con un sistema de esterilización previo a la inoculación y

la toma de muestras. Sin embargo, presenta la desventaja de la formación de gradientes de concentración de oxígeno y nutrientes.

- ✓ **Growtek:** Facilita la toma de muestras y permite un mayor contacto entre el medio de cultivo y el soporte sólido, pero carece de un sistema de aireación.
- ✓ **Proceso continuo:** En este biorreactor, el tiempo de residencia es menor, lo que resulta en un mejor mezclado y crecimiento fúngico, así como una mayor asepsia. No obstante, puede generar aglomeración de células debido al rompimiento micelial. (Ruíz et al., 2007).

2.2.1 Microalgas y Biorreactores

Los biorreactores de microalgas se dividen principalmente en dos categorías: los sistemas abiertos, que están expuestos a la atmósfera, y los sistemas cerrados, conocidos como fotobiorreactores (FBR), donde no hay contacto directo con la atmósfera. La elección entre estos tipos de biorreactores depende de diversos factores, como la escala del cultivo, la disponibilidad de recursos y las necesidades específicas del proceso.

Los sistemas abiertos son comunes debido a su capacidad para permitir un mayor intercambio de gases con la atmósfera. Sin embargo, su uso se ve limitado debido a la falta de control sobre las condiciones de cultivo. Por otro lado, los sistemas cerrados ofrecen ventajas como una fácil cosecha de microorganismos, menor riesgo de contaminación del cultivo y una inversión menor en construcción.

Una de las principales ventajas de emplear biorreactores para el cultivo de microalgas radica en la reducción del riesgo de contaminación de estos microorganismos. Al mantener el cultivo en un entorno controlado y estéril, se minimiza la posibilidad de que agentes externos contaminen el cultivo, lo que garantiza la pureza y calidad del producto final. Además, el uso de biorreactores permite un mayor control sobre las condiciones de cultivo, como la temperatura, el pH y la concentración de nutrientes, lo que favorece un crecimiento óptimo de las microalgas y aumenta la reproducibilidad del cultivo a lo largo del tiempo (Benavente et al., 2012).

Figura 8. *Biorreactores de microalgas.*



Fuente: Mundoagro(2017).

2.2.1.1 Biorreactores de microalgas en la eliminación de contaminantes aire.

Los biorreactores de microalgas se presentan como una solución efectiva para la purificación del aire, gracias a su capacidad de remediación que les permite capturar metales tóxicos y otros contaminantes presentes en las emisiones tanto por actividades industriales como por las actividades cotidianas de las personas. Además, la conversión del dióxido de carbono (CO₂) proveniente de dichas emisiones en oxígeno y carbono secuestrado en biomasa no solo contribuye a la reducción de CO₂ atmosférico, sino que también genera una corriente de aire enriquecido con oxígeno de manera económica, la cual puede ser aprovechada en procesos de combustión originales o industriales, mejorando su eficiencia global.(Rocha et al., 2017).

El uso de estos sistemas se presenta como una alternativa sostenible a los métodos convencionales, dado su amplio espectro de control de contaminantes y versatilidad en las aplicaciones de la biomasa producida. Esto resulta en un menor impacto negativo en el ciclo de vida, convirtiéndolos en la opción más viable para abordar los desafíos ambientales contemporáneos (Kumar et al., 2023).

Análisis de Restricciones y Soluciones

Restricción 1: Reajuste del Objetivo Inicial del Proyecto

- **Restricción:** Inicialmente, el objetivo del proyecto incluía la entrega de un diseño final de un biorreactor acompañado de un prototipo funcional. Sin embargo, tras evaluar los recursos disponibles, el tiempo de ejecución y los desafíos técnicos relacionados, se consideró inviable alcanzar este objetivo en el plazo propuesto. Las limitaciones técnicas para la construcción y el diseño de un prototipo de biorreactor funcional, sumadas a los recursos financieros restringidos, hicieron necesario replantear la orientación del estudio.
- **Solución:** El proyecto se reorienta hacia el cultivo de microalgas y la identificación de las condiciones técnicas óptimas para el crecimiento eficiente de microalgas bajo condiciones controladas de laboratorio y su potencial aplicación en entornos urbanos como Bogotá. Esta decisión permite centrar los esfuerzos en la optimización de parámetros clave como los requerimientos de nutrientes, iluminación y temperatura, además de detallar los costos asociados al proceso. Este enfoque garantiza la obtención de datos sólidos y específicos que sirvan como base para investigaciones futuras y el desarrollo posterior de sistemas más complejos, como biorreactores funcionales. Asimismo, este cambio estratégico asegura que las microalgas cultivadas cumplan con los estándares requeridos para aplicaciones urbanas y respalda la viabilidad técnica del proyecto dentro de las limitaciones actuales.

Restricción 2: Reducción en la Variedad de Cepas Evaluadas

- **Restricción:** Inicialmente, el proyecto contemplaba la evaluación de 15 tipos diferentes de microalgas para determinar su capacidad de remediación de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, la dificultad para adquirir todas las cepas y las limitaciones de tiempo llevaron a reducir la muestra a solo tres tipos de microalgas.
- **Solución:** Al centrarse en la evaluación de solo tres cepas, se logra un análisis más profundo y detallado de cada una, asegurando que se realicen experimentos controlados y rigurosos para estudiar su comportamiento y eficiencia. Esta reducción permite destinar más recursos y tiempo a la caracterización de las microalgas seleccionadas, mejorando la calidad de los datos obtenidos y asegurando que cada

cepa sea evaluada bajo condiciones específicas de temperatura, iluminación y aireación. Aunque la disminución de la variedad limita la comparación entre múltiples especies, esta decisión permite generar información más detallada y precisa, sentando las bases para estudios futuros que puedan ampliar el espectro de especies analizadas.

Restricción 3: Simplificación de Variables Experimentales

- **Restricción:** El proyecto inicialmente planteaba evaluar múltiples variables, tales como la temperatura, la longitud de onda de la luz y la concentración celular, con el objetivo de optimizar las condiciones de crecimiento de las microalgas. Sin embargo, debido a limitaciones de tiempo y recursos, se decidió simplificar el diseño experimental y mantener constantes todas las variables, evaluando únicamente el crecimiento de las microalgas bajo condiciones ideales previamente establecidas.
- **Solución:** El enfoque en evaluar el crecimiento de las microalgas bajo condiciones ideales, sin modificar ninguna variable, permite garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos. Esta decisión estratégica asegura que el estudio se centre en establecer una línea base clara para el crecimiento de las microalgas en condiciones óptimas, proporcionando datos consistentes que serán fundamentales para futuras investigaciones. Aunque esta simplificación implica que no se exploran los efectos de variables como la temperatura, la longitud de onda de la luz o la concentración celular, el análisis detallado bajo condiciones ideales genera un marco de referencia sólido sobre el cual se podrán construir estudios más complejos en el futuro. Este enfoque optimiza el tiempo y los recursos disponibles, sin comprometer la calidad científica del proyecto.

Restricción 4: Sensibilidad de las Microalgas a Contaminantes Biológicos

- **Restricción:** Las microalgas, al ser organismos sensibles, pueden verse afectadas por la presencia de contaminantes biológicos como bacterias, hongos y otros microorganismos. Estas contaminaciones pueden competir con las microalgas por nutrientes, alterar las condiciones del medio de cultivo e incluso inhibir su crecimiento, afectando la eficiencia del proceso de remediación.
- **Solución:** Para mitigar este riesgo, se implementan medidas estrictas de bioseguridad y monitoreo. Esto incluye la esterilización del medio de cultivo antes de su uso, la

utilización de técnicas de aislamiento para mantener la pureza de las cepas y el establecimiento de condiciones controladas de temperatura y pH. Adicionalmente, se invierte en sistemas de monitoreo continuo que permiten la detección temprana de contaminantes biológicos, garantizando la integridad de los cultivos de microalgas durante todo el proceso de investigación. Estas medidas no solo protegen la pureza del cultivo, sino que también aseguran que los resultados obtenidos sean confiables y representen de manera precisa la capacidad de las microalgas para la remediación de contaminantes atmosféricos en Bogotá.

Restricción 5: Monitoreo de Temperatura

- **Restricción:** La temperatura es un parámetro crítico para el cultivo de microalgas, ya que afecta directamente su tasa de crecimiento y la eficiencia de la remediación. El plan inicial contempla un sistema de monitoreo y calentamiento individual para cada experimento, pero los altos costos asociados con esta implementación obligan a reconsiderar esta opción. Las soluciones evaluadas incluyen el uso de dispositivos sous vide, máquinas de baño termostataado y tanques de recirculación, cada una con sus propias limitaciones económicas y logísticas.
- **Solución:** Finalmente, se elige una alternativa más sencilla y económica que consiste en el uso de tinas de agua equipadas con resistencias eléctricas programables y bombas de circulación. Este sistema permite mantener la temperatura homogénea en cada tina, con un costo significativamente menor y una operación más sencilla que las alternativas previamente consideradas. Así, el equipo de investigación asegura un control preciso de la temperatura durante los experimentos, lo que es esencial para estudiar la respuesta de las microalgas a las condiciones térmicas en Bogotá.

Restricción 6: Iluminación

- **Restricción:** La iluminación adecuada es crucial para el crecimiento de las microalgas debido a su impacto directo en la fotosíntesis y, por ende, en la remediación de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, existe una falta de consenso en la literatura científica sobre las longitudes de onda y la intensidad de luz óptimas para este proceso, lo cual dificulta la selección de la fuente de luz más adecuada. Además, los proveedores locales de sistemas de iluminación no siempre poseen el conocimiento técnico

necesario para asegurar que sus productos cumplen con los requerimientos específicos de crecimiento de microalgas.

- **Solución:** Ante estas limitaciones, se decide utilizar luces LED blancas, comúnmente empleadas en experimentos a nivel universitario, que ofrecen una solución práctica para la iluminación de los cultivos. Tras consultas con expertos de empresas como ECOLED, se seleccionan mangueras LED y bombillos con especificaciones que aseguran una intensidad adecuada de lúmenes y luxes para el desarrollo de las microalgas. Esta elección no solo permite un crecimiento eficiente de las microalgas, sino que también facilita el control y ajuste de la iluminación, proporcionando un entorno óptimo para la remediación de contaminantes atmosféricos.

Restricción 7: Acceso y utilización de cepas endémicas

- **Restricción:** En Colombia, la normativa relacionada con el acceso, uso y aprovechamiento de recursos genéticos, como las microalgas, está regulada principalmente por el Decreto 1076 de 2015, que forma parte del Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Este decreto exige la obtención de un Contrato de Acceso a Recursos Genéticos (CARG) aprobado por el Ministerio de Ambiente para utilizar microalgas autóctonas, lo que involucra un proceso complejo de presentación de un proyecto de investigación y evaluación de impactos. Adicionalmente, la Ley 99 de 1993 establece la obligación de garantizar la conservación de los ecosistemas, añadiendo otra capa de regulación al uso de estas especies. Estos requisitos pueden resultar en extensos tiempos de espera y retrasos significativos, lo cual limita la posibilidad de acceder a cepas endémicas para estudios que necesitan resultados en plazos más cortos.
- **Solución:** Para superar estas barreras, el proyecto opta por utilizar cepas de microalgas que, aunque existen naturalmente en Colombia, fueron adquiridas a través de un convenio con la Universidad de Texas y facilitadas por la Universidad EAFIT. Esta estrategia permite cumplir con la legislación vigente sin la necesidad de tramitar permisos de acceso a recursos genéticos, evitando así los largos procesos de aprobación que podrían retrasar el avance de la investigación. De este modo, el proyecto garantiza la viabilidad legal de su enfoque y asegura el desarrollo eficiente de los estudios sobre la remediación de contaminantes atmosféricos con microalgas.

Restricción 8: Adquisición de insumos químicos para el alimento de las microalgas

- **Restricción:** La adquisición de ciertos químicos esenciales para la preparación de medios de cultivo de microalgas en Colombia está sujeta a estrictas regulaciones debido a su potencial uso indebido. Este control se establece en el marco de la Ley 30 de 1986, que regula los estupefacientes y precursores químicos. Muchas de las empresas que suministran estos productos los venden únicamente en presentaciones de 1 kg o más, lo cual excede significativamente la demanda del proyecto, ya que se necesitan cantidades menores a 25 gramos. Este desajuste genera un aumento en los costos del proyecto, además de implicar problemas de almacenamiento y manejo seguro de estos químicos.
- **Solución:** Dado este contexto, la adquisición de los insumos se realiza a través de la universidad que respalda el proyecto, lo cual permite cumplir con las regulaciones y justificaciones requeridas para la compra de estos químicos. Se evalúa la posibilidad de establecer alianzas estratégicas con otras instituciones para acceder a cantidades más adecuadas, optimizando los recursos y reduciendo los costos asociados. Además, se busca la colaboración de proveedores que puedan ofrecer presentaciones más pequeñas y específicas, adaptadas a la escala del estudio, garantizando un manejo seguro y eficiente de los insumos en el laboratorio.

Diseño Metodológico

Fase 1: Planificación y Definición del Proyecto

- ❖ **Objetivos y Alcance:** Se definen los objetivos específicos del proyecto y se delimitan las condiciones experimentales bajo las cuales se evaluarán las microalgas seleccionadas: *Chlorella vulgaris*, *Anabaena inaequalis*, *Arthrospira maxima* y *Scenedesmus armatus*. El enfoque principal será el análisis de las condiciones técnicas óptimas para el cultivo controlado en laboratorio.
- ❖ **Selección de Cepas y Medios de Cultivo:** Se seleccionan las cepas con base en su relevancia científica y capacidad de adaptación a las condiciones de laboratorio. Para *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus armatus* se empleará el medio BBM, mientras que para *Anabaena inaequalis* y *Arthrospira maxima* se utilizará el medio Zarrouk. Ambos medios proporcionan nutrientes esenciales para el desarrollo eficiente de las especies seleccionadas.

Fase 2: Diseño Experimental

- ❖ **Capacitación del Equipo:** El equipo de trabajo recibirá capacitaciones específicas sobre manejo de microalgas, preparación de medios, monitoreo de variables clave y registro de datos en Excel.
- ❖ **Condiciones Controladas:** Se establecen las condiciones ideales de laboratorio, incluyendo rango de temperatura (28-32°C), niveles de pH (6.5-7.5) y parámetros de iluminación (Luz led blanca). Estos factores se mantendrán constantes durante todo el experimento.
- ❖ **Preparación de Medios de Cultivo:** Se preparan los medios de cultivo específicos para cada especie de microalga, asegurando que los nutrientes estén en concentraciones adecuadas para su crecimiento.

Fase 3: Preparación del Sistema Experimental

- ❖ **Instalación de Equipos:** Se equipará el laboratorio con sistemas que permitan un control preciso de temperatura, iluminación y aireación. Esto incluye resistencias eléctricas programables, bombas de circulación para homogeneización térmica y fuentes de iluminación artificial ajustables para cada cepa.

- ❖ **Preparación de los Medios de Cultivo:** Se preparan los medios BBM y Zarrouk en condiciones estériles para garantizar que no se introduzcan contaminantes externos. Cada lote será preparado siguiendo protocolos estandarizados y se documentará el proceso en hojas de registro.

Fase 4: Ejecución del Experimento

- ❖ **Inoculación y Monitoreo Inicial:** Las cepas se inoculan en los medios de cultivo respectivos y se colocan en los sistemas experimentales. Durante esta etapa inicial, se monitorean las variables clave (temperatura, pH, concentración celular) para asegurar que las condiciones sean óptimas desde el inicio.
- ❖ **Seguimiento Continuo:** Se realiza un monitoreo constante de las variables clave utilizando herramientas de medición como termómetros, pH-metros y espectrofotómetros. Los datos se registran en tiempo real y se consolidan en hojas de cálculo en Excel para su posterior análisis.
- ❖ **Control de Condiciones:** El laboratorio se mantendrá en condiciones controladas para minimizar variaciones que puedan afectar los resultados. Se asegura la esterilidad del entorno y el correcto funcionamiento de los sistemas de iluminación, temperatura y aireación.

Fase 4: Análisis de Resultados

- ❖ **Recolección de Datos:** Los datos recopilados incluyen temperatura, pH y concentración celular de las microalgas. Toda esta información se registra y organiza en Excel, lo que permite realizar análisis estadísticos básicos para identificar tendencias y comportamientos específicos de cada cepa.

Fase 5: Documentación

- ❖ **Informe Técnico Final:** Se elabora un informe técnico que incluye una descripción detallada de las condiciones óptimas de cultivo para cada especie de microalga, acompañado de gráficos y tablas generados en Excel.

Alternativas de Solución

Alternativa 1: Cultivo en Sistemas Abiertos en Entornos Urbanos

El cultivo de microalgas en sistemas abiertos, como lagunas o estanques, es una técnica tradicional utilizada principalmente en regiones tropicales y subtropicales con climas cálidos y estables. Sin embargo, este enfoque presenta múltiples desventajas cuando se intenta implementar en un entorno urbano como Bogotá, cuya altitud y clima representan condiciones desfavorables para el crecimiento eficiente de las microalgas. En términos técnicos, las bajas temperaturas promedio de 14 °C y los niveles limitados de radiación solar en Bogotá disminuyen significativamente la productividad de las microalgas, ya que estas suelen requerir temperaturas entre 20 y 30 °C y una intensidad lumínica constante para alcanzar tasas de crecimiento óptimas (Chisti, 2007). Estas limitaciones no solo afectan la eficiencia del cultivo, sino que también aumentan los tiempos necesarios para la acumulación de biomasa, lo que impacta negativamente la viabilidad del proyecto.

Además, los sistemas abiertos están expuestos a un alto riesgo de contaminación por microorganismos externos, como bacterias, hongos o incluso especies invasoras de algas, que pueden competir por los nutrientes y alterar las condiciones del medio de cultivo. Esta contaminación dificulta el mantenimiento de la pureza del cultivo, comprometiendo la calidad de la biomasa producida y reduciendo su aplicabilidad en investigaciones científicas o en procesos industriales (Moreno-Garrido, 2008). Desde una perspectiva ambiental, los sistemas abiertos pueden generar problemas significativos como la eutrofización de cuerpos de agua cercanos debido a la escorrentía de nutrientes del medio de cultivo. Este fenómeno, causado por la acumulación de nitrógeno y fósforo en el agua, tiene graves consecuencias ecológicas, incluyendo la pérdida de biodiversidad acuática y la disminución de la calidad del agua (Kumar et al., 2015). Por lo tanto, aunque esta alternativa puede parecer económicamente más accesible en un inicio, sus implicaciones técnicas y ambientales la convierten en una opción poco sostenible para un entorno urbano como Bogotá.

Alternativa 2: Importación de Biomasa de Microalgas para Aplicaciones Locales

La importación de biomasa de microalgas cultivadas en regiones con condiciones climáticas favorables representa una solución que elimina la necesidad de establecer un sistema de cultivo local. Sin embargo, esta opción presenta importantes desventajas tanto desde un punto de vista ambiental como económico. Una de las principales limitaciones de esta

alternativa es la generación de una elevada huella de carbono asociada con el transporte de biomasa desde otras regiones o países. Este proceso implica un uso intensivo de combustibles fósiles, lo que contrarresta los beneficios ambientales derivados de la utilización de microalgas para la mitigación de contaminantes atmosféricos (Chen et al., 2021). Además, el almacenamiento especializado que requiere la biomasa durante el transporte, incluyendo condiciones específicas de temperatura y humedad para evitar la descomposición, representa un desafío logístico y un costo adicional.

Económicamente, esta alternativa también se ve limitada por la dependencia de proveedores externos, lo que incrementa los costos operativos y genera vulnerabilidades en la cadena de suministro. Estas vulnerabilidades incluyen el riesgo de interrupciones en el suministro debido a factores externos como restricciones comerciales, aumento en los costos de transporte o disponibilidad limitada de biomasa de alta calidad. Esto no solo afecta la sostenibilidad financiera del proyecto, sino que también limita la capacidad de Bogotá para desarrollar un sistema autónomo y adaptado a sus necesidades locales (Norsker et al., 2011). Desde un punto de vista técnico, el uso de biomasa importada no permite ajustar las condiciones del cultivo a las características específicas de Bogotá, lo que puede reducir su eficacia en aplicaciones locales.

Por otro lado, la importación también presenta desafíos relacionados con la adaptabilidad de las microalgas a las condiciones locales una vez aplicadas. Al no haber sido cultivadas en Bogotá, las microalgas importadas podrían no estar optimizadas para las condiciones climáticas, lo que afectaría su rendimiento en términos de captura de CO₂ y otros contaminantes. Esta desconexión subraya la importancia de desarrollar cultivos locales que puedan adaptarse y optimizarse específicamente para las características ambientales de Bogotá, promoviendo así una solución más sostenible y eficiente.

En contraste con estas alternativas, el proyecto se presenta como una solución integral y sostenible al centrarse en el cultivo de microalgas bajo condiciones controladas de laboratorio. Este enfoque no solo permite ajustar de manera precisa las condiciones ambientales, como la temperatura, iluminación y aireación, sino que también elimina los riesgos de contaminación y eutrofización asociados con los sistemas abiertos. Además, al utilizar medios de cultivo adaptados (BBM y Zarrouk) y establecer un protocolo técnico detallado, el proyecto optimiza la productividad de las microalgas seleccionadas (*Chlorella vulgaris*, *Anabaena inaequalis*,

Arthrospira maxima y Scenedesmus armatus) y garantiza la reproducibilidad de los resultados. En términos económicos, la detallada documentación de costos proporciona una base clara para evaluar la viabilidad del proyecto, superando las limitaciones de las soluciones propuestas anteriormente.

Impactos Ambientales

Impactos Ambientales Positivos

➤ **Reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

El cultivo de microalgas representa una solución efectiva para la captura de dióxido de carbono (CO₂), contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Especies como *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus armatus* destacan por su alta capacidad fotosintética, lo que les permite fijar CO₂ atmosférico y convertirlo en biomasa en cantidades significativas. Según Chisti (2007), las microalgas pueden capturar hasta 1,8 kg de CO₂ por cada kg de biomasa producido, una cifra considerablemente mayor que la de las plantas terrestres. Este efecto no solo reduce los niveles de GEI, sino que también permite la generación de aire enriquecido con oxígeno, lo cual tiene un impacto positivo en la calidad del aire urbano.

➤ **Producción de Biomasa de Valor Agregado**

La biomasa generada a partir de microalgas tiene aplicaciones diversas, incluyendo la producción de biocombustibles, biofertilizantes, alimentos funcionales y compuestos bioactivos (Ahmad et al., 2021). Estos subproductos no solo reducen la dependencia de recursos no renovables, sino que también fomentan la economía circular, al transformar residuos en recursos de utilidad. Por ejemplo, *Arthrospira maxima* (espirulina) se emplea ampliamente en la producción de suplementos nutricionales debido a su alto contenido de proteínas y antioxidantes (Vonshak, 2012).

➤ **Contribución a la Innovación Tecnológica y Sostenibilidad Urbana**

El proyecto impulsa el desarrollo de tecnologías innovadoras para el manejo de microalgas, promoviendo soluciones basadas en la naturaleza (SbN) que se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). La implementación de cultivos eficientes de microalgas puede integrarse en entornos urbanos para la remediación de contaminantes, optimizando espacios reducidos y mejorando la calidad de vida de los habitantes (Fundación Conama, 2018). Además, estudios del Departamento Nacional de Planeación (2020) destacan que las SbN pueden generar retornos económicos de entre 7 y 30 veces el monto invertido, lo que resalta su viabilidad como herramienta para el desarrollo sostenible.

➤ **Potencial para Escalabilidad y Aplicaciones Futuras**

La estandarización de protocolos técnicos desarrollados en este proyecto establece una base para futuras aplicaciones a mayor escala. Estas aplicaciones podrían incluir sistemas de biorremediación en plantas de tratamiento de aguas residuales o la incorporación de fotobiorreactores en infraestructuras urbanas para capturar contaminantes y reducir la carga ambiental en ciudades como Bogotá (Rocha et al., 2017).

Impactos Ambientales Negativos

➤ **Consumo Energético y Huella de Carbono**

El mantenimiento de condiciones controladas en el laboratorio requiere un consumo constante de energía eléctrica para sistemas de iluminación, aireación y control de temperatura. Este consumo puede incrementar la huella de carbono del proyecto, especialmente si la electricidad utilizada proviene de fuentes no renovables. Según Pulz y Gross (2004), la energía necesaria para mantener fotobiorreactores en funcionamiento puede representar hasta el 30% de los costos operativos totales. Este impacto subraya la necesidad de explorar alternativas más eficientes, como el uso de energía solar para alimentar los sistemas experimentales.

➤ **Riesgo de Eutrofización por Manejo Inadecuado de Desechos**

El uso de medios de cultivo como BBM y Zarrouk implica la incorporación de altos niveles de nitratos y fosfatos, nutrientes que, si no se gestionan adecuadamente, pueden contribuir a la eutrofización de cuerpos de agua cercanos. Este proceso resulta en el crecimiento excesivo de algas, disminución del oxígeno disuelto y la muerte de organismos acuáticos (Moreno-Garrido, 2008). Por lo tanto, es esencial implementar protocolos estrictos para el manejo y disposición de los desechos líquidos generados durante el proyecto.

➤ **Uso Intensivo de Recursos Hídricos**

El cultivo de microalgas requiere cantidades significativas de agua para la preparación de medios y el mantenimiento de las condiciones de crecimiento. En el contexto de Bogotá, donde los recursos hídricos son limitados debido a la urbanización y la variabilidad climática, este impacto puede generar tensiones adicionales sobre el

suministro de agua (IDEAM, 2022). Es fundamental considerar estrategias de reciclaje y reutilización del agua utilizada en los sistemas experimentales para mitigar este impacto.

➤ **Riesgo de Contaminación Biológica y Escapes Accidentales**

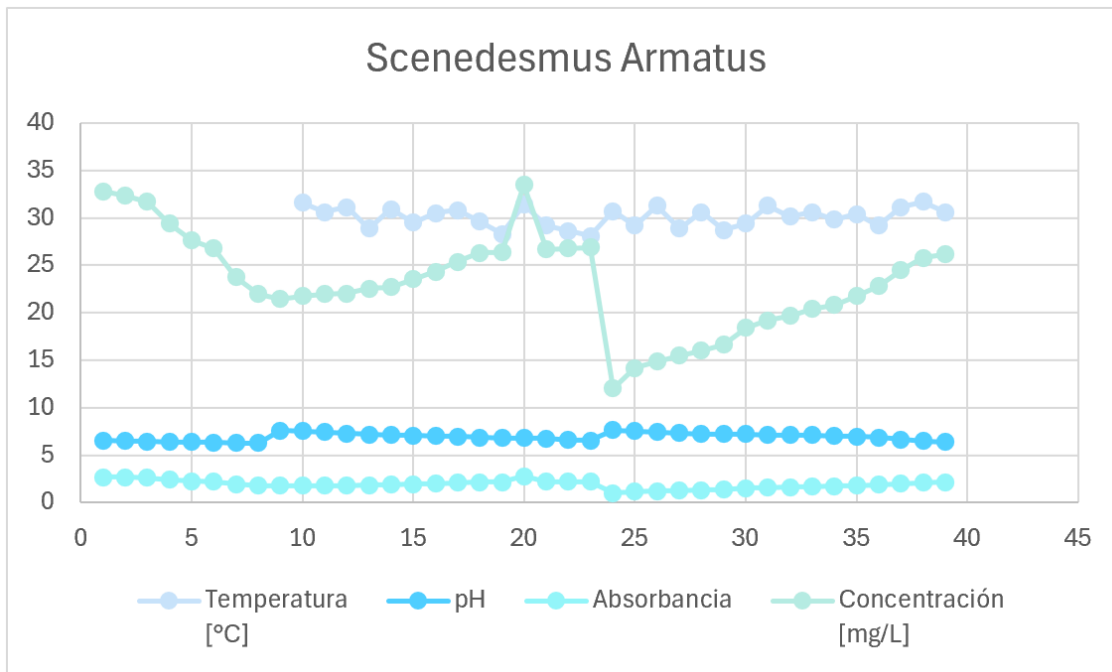
Aunque las microalgas seleccionadas no son consideradas invasoras, existe un riesgo inherente de contaminación ambiental si las cepas utilizadas escapan del entorno controlado. Esto podría alterar los ecosistemas locales, compitiendo con especies autóctonas y generando desequilibrios en la biodiversidad (Ahmad et al., 2021). Por esta razón, se deben implementar medidas estrictas de bioseguridad, incluyendo sistemas de contención y monitoreo regular, para prevenir cualquier tipo de liberación accidental.

➤ **Impactos Económicos en Etapas Iniciales**

Aunque el proyecto no evalúa directamente la viabilidad económica a gran escala, los costos iniciales asociados al diseño y mantenimiento de los sistemas de cultivo pueden representar una barrera para su implementación. Esto incluye la adquisición de insumos químicos, equipos especializados y gastos energéticos (Norsker et al., 2011). Este impacto puede ser mitigado mediante la identificación de fuentes de financiamiento o colaboraciones con instituciones académicas y gubernamentales.

Resultados y Análisis de Resultados

Scenedesmus Armatus					
Día	Fecha	Temperatura [°C]	pH	Absorbancia	Concentración [mg/L]
1	29-oct-24	31,6	6,53	2,689	32,793
2	30-oct-24	30,6	6,51	2,649	32,305
3	31-oct-24	31,1	6,45	2,597	31,671
4	01-nov-24	28,9	6,39	2,412	29,415
5	02-nov-24	30,9	6,37	2,263	27,598
6	03-nov-24	29,5	6,31	2,194	26,756
7	04-nov-24	30,5	6,28	1,949	23,768
8	05-nov-24	30,8	6,26	1,801	21,963
9	06-nov-24	29,6	7,57	1,756	21,415
10	07-nov-24	28,3	7,52	1,783	21,744
11	08-nov-24	31,4	7,41	1,799	21,939
12	09-nov-24	29,2	7,26	1,805	22,012
13	10-nov-24	28,6	7,17	1,849	22,549
14	11-nov-24	28,1	7,12	1,861	22,695
15	12-nov-24	30,7	7,05	1,928	23,512
16	13-nov-24	29,2	6,98	1,993	24,305
17	14-nov-24	31,3	6,95	2,081	25,378
18	15-nov-24	28,9	6,87	2,156	26,293
19	16-nov-24	30,6	6,81	2,161	26,354
20	17-nov-24	28,7	6,77	2,743	33,451
21	18-nov-24	29,4	6,73	2,187	26,671
22	19-nov-24	31,3	6,61	2,195	26,768
23	20-nov-24	30,1	6,54	2,203	26,866
24	21-nov-24	30,6	7,62	0,987	12,037
25	22-nov-24	29,8	7,53	1,164	14,195
26	23-nov-24	30,4	7,41	1,218	14,854
27	24-nov-24	29,2	7,3	1,271	15,500
28	25-nov-24	31,1	7,22	1,311	15,988
29	26-nov-24	31,7	7,21	1,365	16,646
30	27-nov-24	30,6	7,19	1,512	18,439
31	28-nov-24	31,4	7,14	1,574	19,195
32	29-nov-24	29,7	7,13	1,614	19,683
33	30-nov-24	28,3	7,11	1,671	20,378
34	01-dic-24	30,8	7,03	1,709	20,841
35	02-dic-24	31,7	6,94	1,782	21,732
36	03-dic-24	30,4	6,87	1,869	22,793
37	04-dic-24	31,2	6,65	2,009	24,500
38	05-dic-24	30,6	6,49	2,115	25,793
39	06-dic-24	30,9	6,38	2,145	26,159

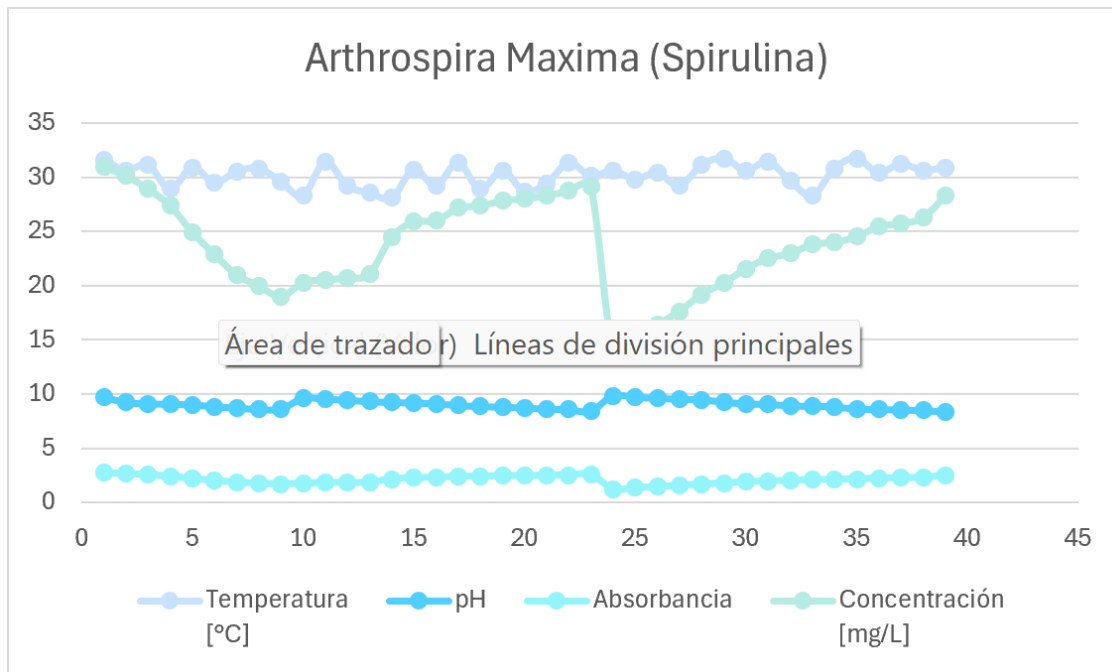


Scenedesmus armatus

El cultivo de *Scenedesmus armatus* mostró un comportamiento inicial prometedor, alcanzando una concentración celular máxima de **32,793 mg/L** en el primer día. Este resultado destaca la capacidad de esta cepa para adaptarse rápidamente a las condiciones de cultivo en laboratorio. Sin embargo, la disminución sostenida en la concentración después del Día 5, que llegó a valores inferiores a **21 mg/L**, evidencia posibles limitaciones en los nutrientes disponibles o acumulación de metabolitos inhibitorios en el medio BBM. La temperatura promedio, que osciló entre 29,5 °C y 31,6 °C, fue adecuada para su crecimiento inicial, aunque el estrés térmico pudo haber contribuido al declive observado en etapas posteriores.

El pH mostró una tendencia inicial hacia valores más ácidos (6,3-6,5), estabilizándose después en un rango de **7,5 a 7,7**, lo que corresponde a las condiciones óptimas conocidas para esta especie. Este comportamiento puede estar relacionado con una mayor actividad fotosintética durante las primeras fases del experimento, seguida de una reducción en la actividad metabólica debido a las limitaciones mencionadas. La absorbancia, como indicador de densidad óptica y actividad fotosintética, también mostró una disminución significativa después del Día 10, lo que sugiere una reducción en la eficiencia fotosintética.

Arthrospira Maxima (Spirulina)				
Día	Temperatura [°C]	pH	Absorbancia	Concentración [mg/L]
1	31,6	9,72	2,724	30,955
2	30,6	9,24	2,653	30,148
3	31,1	9,12	2,547	28,943
4	28,9	9,07	2,411	27,398
5	30,9	9,03	2,195	24,943
6	29,5	8,85	2,016	22,909
7	30,5	8,73	1,849	21,011
8	30,8	8,61	1,759	19,989
9	29,6	8,63	1,672	19,000
10	28,3	9,63	1,784	20,273
11	31,4	9,53	1,809	20,557
12	29,2	9,45	1,821	20,693
13	28,6	9,31	1,857	21,102
14	28,1	9,24	2,155	24,489
15	30,7	9,18	2,278	25,886
16	29,2	9,12	2,287	25,989
17	31,3	8,96	2,391	27,170
18	28,9	8,87	2,408	27,364
19	30,6	8,81	2,451	27,852
20	28,7	8,73	2,467	28,034
21	29,4	8,64	2,491	28,307
22	31,3	8,58	2,531	28,761
23	30,1	8,46	2,563	29,125
24	30,6	9,84	1,241	14,102
25	29,8	9,71	1,348	15,318
26	30,4	9,62	1,443	16,398
27	29,2	9,53	1,552	17,636
28	31,1	9,48	1,689	19,193
29	31,7	9,27	1,783	20,261
30	30,6	9,11	1,896	21,545
31	31,4	9,06	1,984	22,545
32	29,7	8,94	2,021	22,966
33	28,3	8,89	2,096	23,818
34	30,8	8,83	2,113	24,011
35	31,7	8,64	2,157	24,511
36	30,4	8,61	2,241	25,466
37	31,2	8,55	2,264	25,727
38	30,6	8,52	2,313	26,284
39	30,9	8,36	2,487	28,261

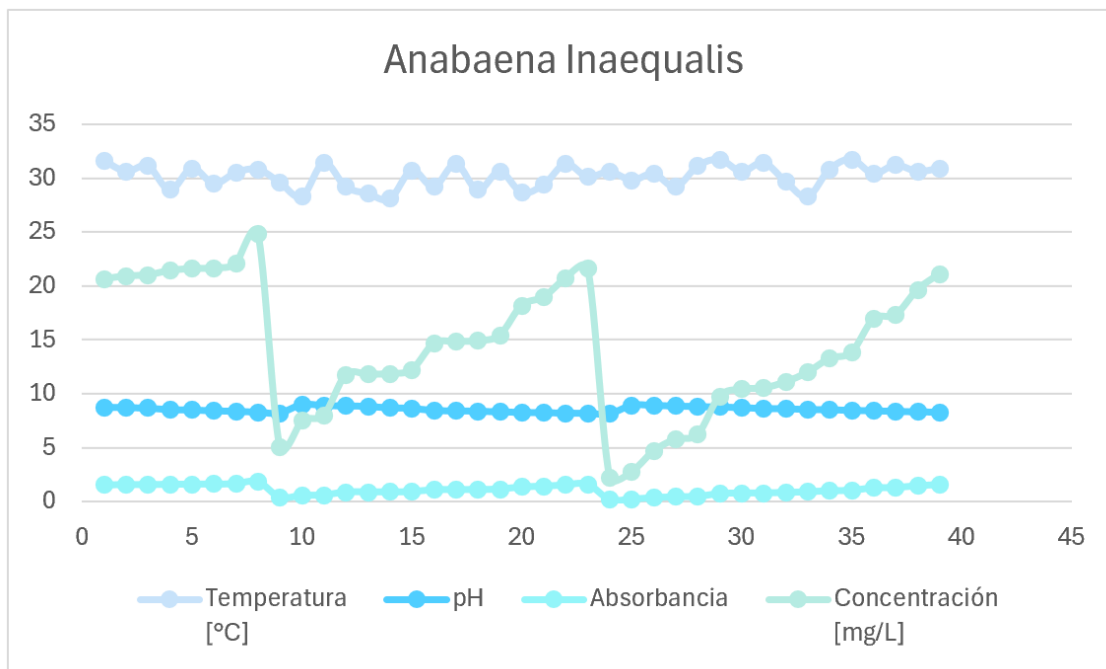


***Arthrospira maxima* (Espirulina)**

Entre las cuatro cepas evaluadas, *Arthrospira maxima* fue la que presentó el comportamiento más estable a lo largo del experimento. Con un rango de pH entre **8,5 y 9,7** y temperaturas de **28,7 °C a 31,7 °C**, esta cepa mostró una gran capacidad de adaptación a las condiciones controladas. La concentración celular alcanzó un pico inicial de **30,955 mg/L** y mantuvo valores relativamente altos hasta el Día 10, con una disminución progresiva en días posteriores. La estabilidad en su crecimiento puede atribuirse a su tolerancia a ambientes alcalinos y su capacidad para fijar carbono de manera eficiente.

La absorbancia inicial de **2,724** y su comportamiento estable en las primeras etapas del cultivo indican una alta eficiencia fotosintética y una rápida acumulación de biomasa. Sin embargo, después del Día 15, se registró una caída en los valores de absorbancia y concentración celular, posiblemente debido a una limitación en la disponibilidad de nutrientes en el medio Zarrouk, lo que resalta la necesidad de un monitoreo más riguroso y ajustes periódicos en el medio de cultivo.

Anabaena Inaequalis				
Día	Temperatura [°C]	pH	Absorbancia	Concentración [mg/L]
1	31,6	8,76	1,547	20,627
2	30,6	8,71	1,568	20,907
3	31,1	8,67	1,575	21,000
4	28,9	8,52	1,606	21,413
5	30,9	8,49	1,619	21,587
6	29,5	8,41	1,623	21,640
7	30,5	8,37	1,654	22,053
8	30,8	8,29	1,861	24,813
9	29,6	8,21	0,379	5,053
10	28,3	9,01	0,563	7,507
11	31,4	8,91	0,601	8,013
12	29,2	8,88	0,881	11,747
13	28,6	8,83	0,884	11,787
14	28,1	8,69	0,889	11,853
15	30,7	8,65	0,916	12,213
16	29,2	8,44	1,098	14,640
17	31,3	8,41	1,112	14,827
18	28,9	8,38	1,117	14,893
19	30,6	8,31	1,156	15,413
20	28,7	8,27	1,364	18,187
21	29,4	8,23	1,421	18,947
22	31,3	8,21	1,553	20,707
23	30,1	8,18	1,621	21,613
24	30,6	8,14	0,169	2,253
25	29,8	8,94	0,207	2,760
26	30,4	8,92	0,351	4,680
27	29,2	8,87	0,433	5,773
28	31,1	8,81	0,465	6,200
29	31,7	8,77	0,732	9,760
30	30,6	8,72	0,781	10,413
31	31,4	8,63	0,789	10,520
32	29,7	8,61	0,831	11,080
33	28,3	8,54	0,898	11,973
34	30,8	8,51	0,995	13,267
35	31,7	8,46	1,037	13,827
36	30,4	8,41	1,269	16,920
37	31,2	8,37	1,298	17,307
38	30,6	8,31	1,473	19,640
39	30,9	8,29	1,583	21,107

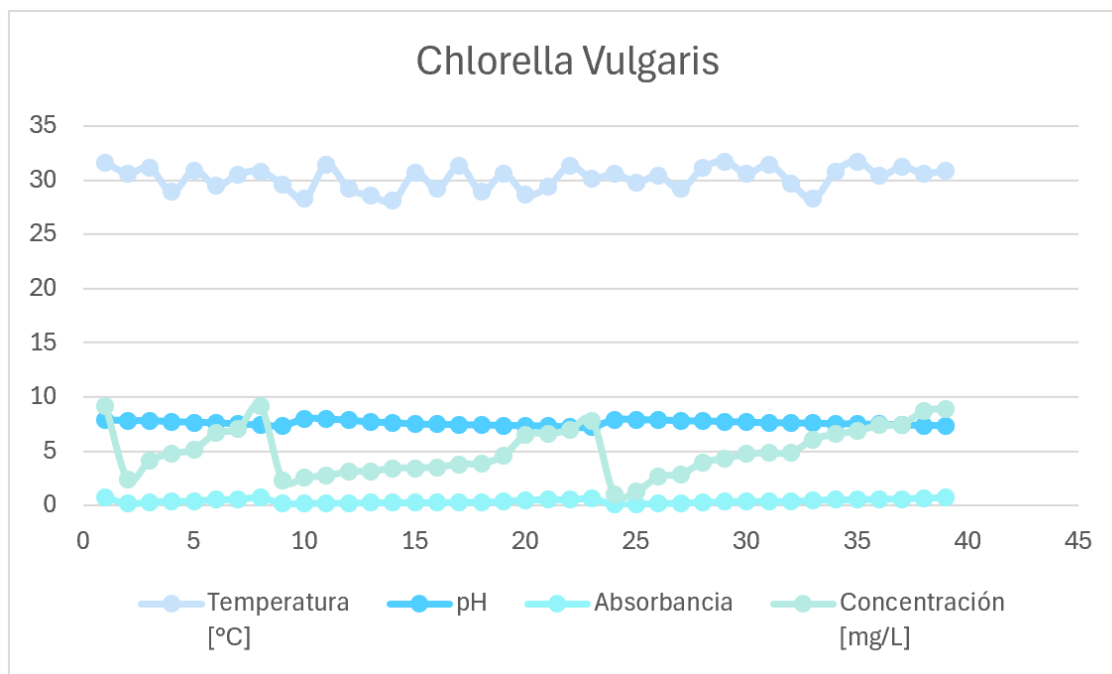


Anabaena inaequalis

Esta cianobacteria mostró un comportamiento inicial estable, con un pH en el rango de **8,3 a 8,9**, adecuado para su desarrollo. La concentración celular alcanzó un máximo de **24,813 mg/L** en el Día 8, pero posteriormente presentó una disminución abrupta, llegando a valores tan bajos como **5,053 mg/L** en días posteriores. Este descenso puede deberse a la acumulación de productos metabólicos tóxicos en el medio o a una reducción en la disponibilidad de nutrientes esenciales.

El impacto del pH y la temperatura en *Anabaena inaequalis* fue particularmente notable, ya que esta especie demostró una alta sensibilidad a cambios menores en estas variables. La absorbancia también reflejó esta sensibilidad, con valores que oscilaron entre **1,547 y 2,453** al inicio del cultivo, pero que disminuyeron drásticamente después del Día 10. Esto sugiere que, aunque esta especie tiene potencial para aplicaciones específicas, requiere un manejo más cuidadoso de las condiciones ambientales y del medio Zarrouk para mantener su rendimiento.

Chlorella Vulgaris				
Día	Temperatura [°C]	pH	Absorbancia	Concentración [mg/L]
1	31,6	7,89	0,735	9,188
2	30,6	7,84	0,195	2,438
3	31,1	7,81	0,331	4,138
4	28,9	7,75	0,382	4,775
5	30,9	7,66	0,412	5,150
6	29,5	7,63	0,535	6,688
7	30,5	7,51	0,562	7,025
8	30,8	7,42	0,732	9,150
9	29,6	7,34	0,183	2,288
10	28,3	8,01	0,205	2,563
11	31,4	7,98	0,219	2,738
12	29,2	7,87	0,247	3,088
13	28,6	7,69	0,251	3,138
14	28,1	7,64	0,273	3,413
15	30,7	7,51	0,276	3,450
16	29,2	7,48	0,281	3,513
17	31,3	7,45	0,304	3,800
18	28,9	7,41	0,309	3,863
19	30,6	7,38	0,367	4,588
20	28,7	7,36	0,521	6,513
21	29,4	7,31	0,529	6,613
22	31,3	7,24	0,556	6,950
23	30,1	7,21	0,624	7,800
24	30,6	7,93	0,079	0,988
25	29,8	7,91	0,101	1,263
26	30,4	7,89	0,211	2,638
27	29,2	7,81	0,227	2,838
28	31,1	7,79	0,316	3,950
29	31,7	7,75	0,345	4,313
30	30,6	7,67	0,379	4,738
31	31,4	7,63	0,387	4,838
32	29,7	7,61	0,389	4,863
33	28,3	7,58	0,487	6,088
34	30,8	7,54	0,526	6,575
35	31,7	7,51	0,549	6,863
36	30,4	7,48	0,593	7,413
37	31,2	7,41	0,597	7,463
38	30,6	7,38	0,699	8,738
39	30,9	7,36	0,712	8,900



Chlorella vulgaris

Chlorella vulgaris mostró el crecimiento más lento y limitado entre las cepas evaluadas. Su concentración celular inicial fue de **9,188 mg/L**, alcanzando un máximo de **8,900 mg/L** hacia el final del experimento. Este comportamiento destaca la sensibilidad de esta especie a las condiciones de cultivo, particularmente al pH, que osciló entre **7,3 y 7,9**. La absorbancia también fue consistentemente baja, con valores máximos de **0,732**, lo que indica una limitada capacidad fotosintética en comparación con las otras cepas.

El medio BBM, aunque diseñado para favorecer el crecimiento de microalgas verdes, pudo no haber proporcionado los nutrientes o proporciones adecuadas para optimizar el rendimiento de *Chlorella vulgaris*. Además, la baja actividad fotosintética reflejada en los valores de absorbancia sugiere que las condiciones de iluminación podrían no haber sido ideales para esta cepa, lo que subraya la necesidad de ajustes específicos en las condiciones experimentales para maximizar su productividad.

Análisis General

El análisis comparativo de las cuatro cepas evaluadas resalta a *Arthrospira maxima* como la especie más robusta y eficiente en condiciones controladas de laboratorio. Su comportamiento estable, tanto en términos de pH (8,5 a 9,7) como de temperatura (28,7 °C a

31,7 °C), demuestra una notable capacidad de adaptación y resistencia a fluctuaciones ambientales. Además, esta cepa mostró un crecimiento sostenido a lo largo del experimento, alcanzando concentraciones celulares máximas superiores a 30 mg/L. Su alto rendimiento fotosintético y tolerancia a condiciones alcalinas confirman su idoneidad para aplicaciones en entornos controlados y potencialmente urbanos, donde la estabilidad es un factor clave.

Por otro lado, *Scenedesmus armatus* mostró un crecimiento inicial vigoroso, alcanzando picos de concentración celular de hasta 32 mg/L en los primeros días. Sin embargo, su desempeño disminuyó significativamente en etapas posteriores, lo que podría atribuirse a limitaciones nutricionales en el medio BBM o a la acumulación de metabolitos inhibitorios. Aunque esta cepa presenta un potencial considerable en términos de productividad inicial, su mantenimiento requiere ajustes específicos en la composición del medio y en las condiciones ambientales para garantizar un rendimiento consistente a largo plazo. *Anabaena inaequalis* mostró un comportamiento intermedio, destacándose por su capacidad de alcanzar picos de concentración celular notables en las primeras etapas del cultivo. Sin embargo, su marcada sensibilidad a variaciones en pH y temperatura limita su rendimiento en condiciones no optimizadas. Esta cepa, aunque prometedora, requiere un manejo más riguroso y controlado para mitigar las fluctuaciones en su crecimiento y maximizar su eficiencia.

Finalmente, *Chlorella vulgaris* presentó el crecimiento más limitado entre las cepas analizadas, con concentraciones celulares que rara vez superaron los 9 mg/L. Este desempeño subóptimo puede atribuirse a las limitaciones del medio BBM para satisfacer las necesidades específicas de esta microalga y a la posible insuficiencia de las condiciones de iluminación utilizadas en el experimento. Estos resultados resaltan la necesidad de ajustar parámetros clave, como la composición del medio de cultivo y las características de la iluminación, para mejorar el rendimiento de esta cepa.

En términos generales, los resultados enfatizan la importancia de personalizar las condiciones de cultivo para cada especie de microalga, atendiendo a sus requerimientos específicos de temperatura, pH, nutrientes e iluminación. La variabilidad observada en el comportamiento de las cepas destaca la necesidad de desarrollar protocolos técnicos diferenciados y un monitoreo continuo que garantice la estabilidad y el rendimiento óptimo en sistemas controlados. Además, estos hallazgos proporcionan una base sólida para futuras

investigaciones, especialmente en la implementación de tecnologías de biorremediación y producción de biomasa en entornos urbanos.

Conclusiones

El proyecto logró cumplir los objetivos establecidos al identificar las condiciones técnicas óptimas para el cultivo de microalgas bajo condiciones controladas de laboratorio. Se evaluaron cuatro cepas específicas (*Arthrospira maxima*, *Scenedesmus armatus*, *Anabaena inaequalis* y *Chlorella vulgaris*), seleccionadas por sus capacidades potenciales de crecimiento y adaptabilidad. Los resultados destacaron que *Arthrospira maxima* fue la especie más eficiente y robusta, con un crecimiento sostenido y estable en las condiciones experimentales. Esta cepa demostró tolerancia a variaciones de temperatura y pH, consolidándose como la mejor opción para futuras aplicaciones en sistemas controlados y urbanos.

El uso de medios de cultivo específicos, como BBM para *Scenedesmus armatus* y *Chlorella vulgaris*, y Zarrouk para *Arthrospira maxima* y *Anabaena inaequalis*, permitió maximizar las capacidades de cada cepa. Sin embargo, se observó que *Chlorella vulgaris* presentó un desempeño limitado, lo que señala la necesidad de ajustar su entorno de cultivo para mejorar su productividad. Este hallazgo resalta la importancia de adaptar las condiciones de cultivo según los requerimientos específicos de cada microalga para optimizar los resultados.

La metodología implementada fue rigurosa y estructurada en fases, lo que permitió realizar un análisis exhaustivo de las condiciones experimentales. No obstante, se identificaron limitaciones inherentes al proyecto. Una de las principales fue la exclusión de pruebas en condiciones ambientales reales, lo que restringe la aplicabilidad inmediata de los resultados en entornos no controlados. Además, la simplificación del diseño experimental al centrarse únicamente en variables básicas, como temperatura y pH, dejó fuera la evaluación de factores como la intensidad lumínica, que podrían influir significativamente en el rendimiento de las cepas estudiadas.

A pesar de estas limitaciones, el proyecto representa un avance significativo en el desarrollo de tecnologías basadas en microalgas. Se estableció un protocolo técnico detallado que podrá ser utilizado como base para investigaciones futuras y aplicaciones más amplias. Las proyecciones incluyen la posible implementación de *Arthrospira maxima* y *Scenedesmus armatus* en sistemas de biorremediación urbana, con el objetivo de aprovechar sus características únicas para abordar problemas ambientales. Este estudio no solo aporta un marco técnico sólido, sino que también refuerza la necesidad de seguir investigando y optimizando las condiciones de cultivo de microalgas para maximizar su impacto positivo en el desarrollo sostenible.

Referencias

- Bailey, D., et al. (2014). *Environmental challenges and solutions for microalgae cultivation*. *Biotechnology Advances*, 32(3), 599–610.
- Chen, C. Y., et al. (2011). *Production of microalgal biodiesel in a photobioreactor*. *Bioresource Technology*, 102(1), 105–112.
- Chisti, Y. (2007). *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306.
- FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture*. Food and Agriculture Organization.
- Grobbelaar, J. U. (2009). *Microalgal biomass production: challenges and opportunities*. *Journal of Applied Phycology*, 21(1), 155–161.
- Kumar, K., et al. (2015). *Potential of algae in biofuel production*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 395–403.
- Norsker, N. H., et al. (2011). *Microalgal production—a close look at the economics*. *Biotechnology Advances*, 29(1), 24–27.
- Pulz, O., & Gross, W. (2004). *Valuable products from biotechnology of microalgae*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 65(6), 635–648.
- Razzak, S. A., et al. (2013). *Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae cultivation*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 622–653.
- IDEAM. (2022). *Estado del clima en Colombia: Informe anual*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015: Normativa ambiental en Colombia*.
- Norsker, N. H., et al. (2011). *Microalgal production—a close look at the economics*. *Biotechnology Advances*, 29(1), 24–27.
- Behera, S., Singh, R., Sharma, A., & Gupta, P. (2020). *Algal biofilm technology for wastewater treatment and sustainable bioenergy production: Recent advances and future perspectives*. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100620.

- Belay, A., Ota, Y., Miyakawa, K., & Shimamatsu, H. (2013). Current knowledge on potential health benefits of spirulina. *Journal of Applied Phycology*, 5(4), 235-245.
- Cheng, L., Zhang, L., Chen, H., & Gao, C. (2006). Carbon dioxide removal from simulated flue gas by absorption and fixation using microalgae. *Energy Conversion and Management*, 47(13-14), 2180-2189.
- Hernández-Morales, F., Sánchez-Ramos, M., & Álvarez-Ramírez, J. (2018). Use of *Anabaena* sp. in the removal of nitrates in wastewater treatment. *Environmental Technology Reviews*, 7(1), 14-23.
- Hosseini, S., Scott, J. A., & Patel, R. (2020). Microalgae cultivation for carbon sequestration and biomass production: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(8), 9261-9274.
- Mahmoud, H., Al-Kharsa, M., & Basem, A. (2021). Effect of *Anabaena* sp. on nutrient removal in wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124379.
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217-232.
- Rippka, R., Deruelles, J., Waterbury, J. B., Herdman, M., & Stanier, R. Y. (1979). Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria. *Journal of General Microbiology*, 111(1), 1-61.
- Vonshak, A. (2012). *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*. Taylor & Francis.
- Bischoff, H. W., & Bold, H. C. (1963). Some soil algae from enchanted rock and related algal species. *University of Texas Publication*, 6318, 1-95.
- Bold, H. C. (1949). The morphology of *Chlamydomonas chlamydogama*, sp. nov. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 76(2), 101-108.
- Borowitzka, M. A. (2018). Microalgae for aquaculture: Opportunities and constraints. *Journal of Applied Phycology*, 1(3), 283-296.

- Richmond, A. (2004). *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Blackwell Science Ltd.
- Zarrouk, C. (1966). Contribution à l'étude d'une cyanophycée: *Spirulina platensis* (Thèse de doctorat). University of Paris.
- Ahmad, A., Ahmad, Z., & Pervez, A. (2021). *Microalgal Biotechnology: Applications in Wastewater Treatment and Biofuels*. Springer.
- Bailey, D., & Grossman, A. R. (2014). Photoprotection in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Annual Review of Genetics*, 48(1), 71-92.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306.
- Fundación Conama. (2018). Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN): Guía para el diseño de proyectos sostenibles. Madrid.
- IDEAM. (2022). *Condiciones climáticas de Bogotá: Informe técnico anual*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Kumar, K., & Das, D. (2015). Growth characteristics of cyanobacteria during high pH conditions and carbon dioxide sequestration. *Journal of Applied Phycology*, 27(1), 7–13.
- Moreno-Garrido, I. (2008). Microalgae immobilization: Current techniques and uses. *Bioresource Technology*, 99(10), 3949-3964.
- Norsker, N. H., Barbosa, M. J., & Vermuë, M. H. (2011). Microalgal production—a close look at the economics. *Biotechnology Advances*, 29(1), 24–27.
- Rocha, L., Gómez, C., & López, J. (2017). Advances in microalgal biotechnology for bioenergy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 782–795.
- Organización Mundial de la Salud. (2021). Guidelines for air quality. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2021). Informe anual de calidad del aire en Bogotá. <http://www.ambientebogota.gov.co/>

- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. (2022). Reporte anual de calidad del aire.
<http://www.ambientebogota.gov.co/calidad-del-aire>
- Dirección de Recursos Naturales Grupo Calidad Hídrica. (2023). Informe sobre la calidad de las aguas residuales en Bogotá. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024). Impacto de los incendios forestales en la calidad del aire en Bogotá. IDEAM.
- IQAir. (2024). Bogotá air quality index (AQI) and Colombia air pollution.
<https://www.iqair.com/colombia/bogota>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Políticas de control de contaminación del aire en Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/>
- Gutiérrez, J., & Ramírez, L. (2024). Análisis de la eficacia de las microalgas en la remediación de contaminantes atmosféricos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 26(3), 45-60.
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v26n3.12345>
- Abalde, J., Cid, A., Fidalgo, J., Torres, E. y Herrero, C. (1995). *Microalgas: Cultivos y Aplicaciones*. Universidad de Coruña.
https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/25013/Abalde_Julio_1995_Microalgas_cultivo_aplicaciones.pdf
- Benavente, R., Montanez, J., Aguilar, C., Zavala, A. y Valdivia, B. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. *Acta Química mexicana*.
https://www.researchgate.net/publication/262560081_Tecnologia_de_Cultivo_de_Microalgas_en_Fotobiorreactores/citation/download
- Bonilla, J. A., Morales, R., & Aravena, C. (2021, agosto). Análisis de desigualdades múltiples y políticas de reducción de la contaminación. Universidad de los Andes.
<https://economia.uniandes.edu.co/sites/default/files/publicaciones/disc-ambiente/Discusiones-sobre-Ambiente-para-el-Desarrollo-No.5.pdf>
- Chen, J., Dai, L., Mataya, D., Cobb, K., Chen, P., & Ruan, R. (2022). Enhanced sustainable integration of CO₂ utilization and wastewater treatment using microalgae in circular economy concept. *Bioresource Technology*, 366, 128188.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.128188>

- Choi, H. (2015). Intensified Production of Microalgae and Removal of Nutrient Using a Microalgae Membrane Bioreactor (MMBR). *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 175(4), 2195-2205. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1007/s12010-014-1365-5>
- Comunicaciones BCV. (2020). ¿Cómo mejorar la calidad del aire de Bogotá?. Bogotá Como Vamos. <https://bogotacomovamos.org/como-mejorar-la-calidad-del-aire-de-bogota/>
- Desigualdad ambiental y la calidad del aire. (s. f.). Universidad de los Andes. Genially. <https://view.genial.ly/612559cd252eba0d03a9b669>
- Dirección De Recursos Naturales Grupo Calidad Hídrica. (2023). Boletín Del Índice De Calidad Del Agua – ICA 2022. Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca – CAR. <https://www.car.gov.co/uploads/files/649cc5de03d3d.pdf>
- Frank, Gregory, Jeffrey Chalmers, Roger G. Harrison, Paul W. Todd, Scott R. Rudge, Demetri P. Petrides, Clint Pepper, Brandon Downey, Jeffrey Breit, Michael J. Betenbaugh y Nathan Calzadilla. 2019. “Biorreactores Y Procesos Upstream”. Cap. 20.2 en el Manual de ingenieros químicos de Perry . 9ª ed., editada por Don W. Green y Marylee Z. Southard. Nueva York: McGraw-Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/content/book/9780071834087/toc-chapter/chapter20/section/section10>
- Fundación Conama. (2018). Soluciones Basadas En La Naturaleza. Madrid: Conama. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Victor-Manzanares-Vazquez/publication/329758948_Soluciones_basadas_en_la_Naturaleza_-_CONAMA_RUMBO_2030_2018/links/5c194c2b458515a4c7e857dd/Soluciones-basadas-en-la-Naturaleza-CONAMA-RUMBO-2030-2018.pdf
- Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). (2023). Informe sobre la calidad del aire y el tratamiento de aguas residuales en Bogotá. Bogotá: DAMA.
- Universidad Nacional de Colombia. (2023). Estudio sobre la contaminación del aire y las aguas residuales en Bogotá. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. (2023). Estudio sobre la eficacia de los biorreactores de microalgas en el tratamiento de aire y aguas contaminadas. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernandez, A. y Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/revbiolmar/v49n2/art01.pdf>
- Herramientas para medir la calidad del aire en Bogotá. (s. f.). Secretaría Distrital de Ambiente. <https://www.ambientebogota.gov.co/calidad-del-aire>
- Kumar, P., Arora, K., Chanana, I., Kulshreshtha, S., Thakur, V., & Choi, K. Y. (2023). Comparative study on conventional and microalgae-based air purifiers: Paving the way for sustainable green spaces. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111046. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.111046>
- La calidad del aire - Secretaría Distrital de Ambiente. (s. f.). Secretaría Distrital de Ambiente. <https://www.ambientebogota.gov.co/la-calidad-del-aire>
- Ortiz Durán, E. Y., Vásquez Ramírez, J. A., Blanco Fajardo, K. J., & Gómez Gómez, D. L. (2022). Inventarios de emisiones Bogotá. Google Docs. <https://docs.google.com/file/d/1dsikDkxa-aLubE0Ly97HvqYcqZ4nqADs/view>
- Portafolio. (2023, 04 marzo). En 2023 ya van dos alertas por la calidad del aire en Bogotá. Portafolio.co. <https://www.portafolio.co/economia/mala-calidad-del-aire-en-bogota-ya-van-dos-alertas-en-2023-580974>
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. (2022). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá Año 2021. Secretaría Distrital de Ambiente. http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/informe%20anual%202021_.pdf
- Rocha, A. A., Wilde, C., Hu, Z., Nepotchatykh, O., Nazarenko, Y., & Ariya, P. A. (2017). Development of a hybrid photo-bioreactor and nanoparticle adsorbent system for the removal of CO₂, and selected organic and metal co-pollutants. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 41–53. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2016.12.010>
- Rocha, J. O. (2021, 16 diciembre). Respirar buen aire en Bogotá: un lujo de pocos. Universidad de los Andes - Colombia - Sitio Oficial. <https://uniandes.edu.co/es/noticias/ingenieria/la-desigualdad-de-la-calidad-del-aire-en-bogota>

Secretaria distrital de ambiente. (2023). Conoce las medidas de prevención y mitigación contempladas en la Alerta Fase 1 por calidad del aire.

https://www.ambientebogota.gov.co/noticias-de-ambiente1/-/asset_publisher/CWsNLtoGa4f6/content/calidad-del-aire-bogota-medidas-mitigacion

Secretaria distrital de ambiente. (2024) Inventario de gases de efecto invernadero – INGEI.

<https://www.ambientebogota.gov.co/inventario-de-gases-de-efecto-invernadero-ingei>

Abalde, J., Cid, A., Fidalgo, J., Torres, E. y Herrero, C. (1995). *Microalgas: Cultivos y Aplicaciones*. Universidad de Coruña. <https://shorturl.at/hFYzP>

Ahmad, I., Abdullah, N., Koji, I., Yuzir, A., & Mohamad, S. (2021). Potential of Microalgae in Bioremediation of Wastewater. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 16(2), 413-429. <https://shorturl.at/6IJFa>

Alvarez, G. (2017). El reúso de aguas residuales en Colombia. Universidad Externado de Colombia. <https://shorturl.at/rIQIL>

Ayala, E. (2015). Clasificación taxonómica de microalgas presentes en un consorcio microbiológico que biorremedia el efluente de una planta de sacrificio de bovinos y porcinos. [Trabajo de pregrado, Universidad de los Andes]. <https://shorturl.at/uW5Nk>

Batista, A. P., Ambrosano, L., Graça, S., Sousa, C., Marques, P. A. S. S., Ribeiro, B., Botrel, E. P., Castro Neto, P., & Gouveia, L. (2015). Combining urban wastewater treatment with biohydrogen production – An integrated microalgae-based approach. *Bioresource Technology*, 184, 230–235. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.10.064>

Benavente, R., Montanez, J., Aguilar, C., Zavala, A. y Valdivia, B. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. *Acta Química mexicana*. https://www.researchgate.net/publication/262560081_Tecnologia_de_Cultivo_de_Microalga_en_Fotobiorreactores/citation/download

Bonilla, J. A., Morales, R., & Aravena, C. (2021, agosto). Análisis de desigualdades múltiples y políticas de reducción de la contaminación. Universidad de los Andes. t.ly/zbGmT

Chen, J., Dai, L., Mataya, D., Cobb, K., Chen, P., & Ruan, R. (2022). Enhanced sustainable integration of CO₂ utilization and wastewater treatment using microalgae in circular economy concept. *Bioresource Technology*, 366, 128188. t.ly/Xtl5C

- Choi, H. (2015). Intensified Production of Microalgae and Removal of Nutrient Using a Microalgae Membrane Bioreactor (MMBR). *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 175(4), 2195-2205. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1007/s12010-014-1365-5>
- Comunicaciones BCV. (2020). ¿Cómo mejorar la calidad del aire de Bogotá?. Bogotá Como Vamos. t.ly/SAJgW
- Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). (2023). Informe sobre la calidad del aire y el tratamiento de aguas residuales en Bogotá. Bogotá: DAMA.
- Departamento Nacional de Planeación. (2020). Potencial de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN).
- Desigualdad ambiental y la calidad del aire. (s. f.). Universidad de los Andes. Genially. t.ly/qssMF
- Dirección De Recursos Naturales Grupo Calidad Hídrica. (2023). Boletín Del Índice De Calidad Del Agua – ICA 2022. Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca – CAR. t.ly/Y5WCJ
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - ESP. (2024). Acueducto. Obtenido de t.ly/GcZxG
- Frank, Gregory, Jeffrey Chalmers, Roger G. Harrison, Paul W. Todd, Scott R. Rudge, Demetri P. Petrides, Clint Pepper, Brandon Downey, Jeffrey Breit, Michael J. Betenbaugh y Nathan Calzadilla. 2019. “Biorreactores Y Procesos Upstream”. Cap. 20.2 en el Manual de ingenieros químicos de Perry . 9ª ed., editada por Don W. Green y Marylee Z. Southard. Nueva York: McGraw-Hill Education. <https://t.ly/apnm->
- Fundación Conama. (2018). Soluciones Basadas En La Naturaleza. Madrid: Conama. Obtenido de t.ly/Ljseh
- Gaviria, N. (2022). Distrito advierte deficiencias en la Ptar de Salitre a menos de 60 días para su entrega. *El Espectador*. t.ly/asgKy
- Hernandez, A. y Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/revbiolmar/v49n2/art01.pdf>

- Herramientas para medir la calidad del aire en Bogotá. (s. f.). Secretaría Distrital de Ambiente.
<https://www.ambientebogota.gov.co/calidad-del-aire>
- Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. (2023). Estudio sobre la eficacia de los biorreactores de microalgas en el tratamiento de aire y aguas contaminadas. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kumar, P., Arora, K., Chanana, I., Kulshreshtha, S., Thakur, V., & Choi, K. Y. (2023). Comparative study on conventional and microalgae-based air purifiers: Paving the way for sustainable green spaces. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111046.
<https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.111046>
- La calidad del aire - Secretaría Distrital de Ambiente. (2024). Secretaría Distrital de Ambiente.
<https://www.ambientebogota.gov.co/la-calidad-del-aire>
- Lihua Cheng, L. Z. (2006). Carbon dioxide removal from air by microalgae cultured in a membrane-photobioreactor. *Separation and Purification Technology*, 50(3), 324-329. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.12.006>
- Moreno, E. Vanegas, D. (2017). Diseño y construcción de un biorreactor esterilizable y de bajo costo para el estudio de crecimiento de microorganismos [Trabajo de pregrado, Universidad distrital Francisco José de Caldas]. <https://t.ly/Kpv7G>
- N. Abdel-Raouf, A. A.-H. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257-275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>.
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2023). Informe sobre la economía verde y la creación de empleo. Ginebra: OIT.
- Ortiz Durán, E. Y., Vásquez Ramírez, J. A., Blanco Fajardo, K. J., & Gómez Gómez, D. L. (2022). Inventarios de emisiones Bogotá. Google Docs. <https://t.ly/KWdXM>
- Panda, Tapobrata. 2011. "Comprensión de los biorreactores". Cap. 2 en *Biorreactores: Análisis y Diseño*. 1ª edición. Nueva York: McGraw Hill Education (India) Private Limited.
<https://t.ly/CDU2V>
- Portafolio. (2023, 04 marzo). En 2023 ya van dos alertas por la calidad del aire en Bogotá. Portafolio.co. <https://t.ly/dfhgb>

- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. (2022). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá Año 2021. Secretaría Distrital de Ambiente.
http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/informe%20anual%202021_.pdf
- Rocha, A. A., Wilde, C., Hu, Z., Nepotchatykh, O., Nazarenko, Y., & Ariya, P. A. (2017). Development of a hybrid photo-bioreactor and nanoparticle adsorbent system for the removal of CO₂, and selected organic and metal co-pollutants. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 41–53. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2016.12.010>
- Rocha, J. O. (2021, 16 diciembre). Respirar buen aire en Bogotá: un lujo de pocos. Universidad de los Andes - Colombia - Sitio Oficial. https://t.ly/Yg1K_
- Ruíz-Leza, H. A.; Rodríguez-Jasso, R. M.; Rodríguez-Herrera, R.; Contreras-Esquivel, J. C.; Aguilar. (2007). Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido. *Revista mexicana de ingeniería química* vol. 6. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62060105.pdf>
- Secretaria distrital de ambiente. (2023). Conoce las medidas de prevención y mitigación contempladas en la Alerta Fase 1 por calidad del aire. <https://t.ly/yJSGd>
- Secretaria distrital de ambiente. (2024) Inventario de gases de efecto invernadero – INGEI. <https://www.ambientebogota.gov.co/inventario-de-gases-de-efecto-invernadero-ingei>
- Universidad Central. (2018). Plantas de tratamiento de aguas residuales del río Bogotá generan gases de efecto invernadero. <https://www.ucentral.edu.co/noticentral/plantas-tratamiento-aguas-residuales-del-rio-bogota-generan-gases-efecto-invernadero>
- Universidad Nacional de Colombia. (2023). Estudio sobre la contaminación del aire y las aguas residuales en Bogotá. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas, C. (2021). Alcaldía de Bogotá. Obtenido de <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/bogota-en-las-5-ciudades-del-mundo-que-toma-medidas-para-limpiar-aire>
- Índice de la calidad del aire (ICA) de Carvajal - Sevillana y contaminación del aire de Bogotá | IQAir. (n.d.). <https://www.iqair.com/es/colombia/bogota-dc/bogota/carvajal-sevillana>
- The World Air Quality Index project. (n.d.). Contaminación del aire de Bogota: Índice PM_{2.5} de Calidad del Aire (ICA) en tiempo real. [aqicn.org. https://aqicn.org/city/bogota/es/](https://aqicn.org/city/bogota/es/)

Del Aire En El Suroccidente De Bogotá, D. D. a. F. 1. P. C. (2024, March 6). Distrito declaró Alerta Fase 1 por calidad del aire en el suroccidente de Bogotá. Bogota.gov.co.
<https://t.ly/PeOEw>

Alerta calidad del aire en suroccidente de Bogotá - Archivo de noticias - Secretaría Distrital de Ambiente. (2024, abril 12). Secretaría Distrital De Ambiente. <https://t.ly/-79b->

¿Cómo está la calidad del agua de los principales ríos de Bogotá? - Archivo de noticias - Secretaría Distrital de Ambiente. (2023, May 12). Secretaría Distrital De Ambiente.
<https://t.ly/nqJQW>

Cómo mide la Secretaría de Ambiente la calidad del agua de los ríos de Bogotá - Noticias de Ambiente - Secretaría Distrital de Ambiente. (2023, Aug 22). Secretaría Distrital De Ambiente. <https://t.ly/Gs4Xp>

La Calidad Del Agua En Los Afluentes Del Río Bogotá ¡Cuidalo!, C. C. E. (2023, May 12). Conoce cómo está la calidad del agua en los afluentes del río Bogotá ¡Cuidalo! Bogota.gov.co.
<https://t.ly/KRr3e>

Comunicaciones. (2022, May 12). Así Avanza La Recuperación Del Río Bogotá -. <https://www.minambiente.gov.co/asi-avanza-la-recuperacion-del-rio-bogota/>

Autoridades presentaron avances en descontaminación del río Bogotá y lo que viene para este importante afluente - búsqueda - Secretaría Distrital de Ambiente. (2020, May 12). Secretaría Distrital De Ambiente. <https://acortar.link/RjMzxX>

Administradorieu. (2019, Feb 28). La mala calidad del aire provoca daños graves a la salud y a los ecosistemas. Instituto De Estudios Urbanos.
<https://www.ieu.unal.edu.co/en/medios/noticias-del-ieu/item/la-mala-calidad-del-aire-provoca-danos-graves-a-la-salud-y-a-los-ecosistemas>

Junca, I. (2021, May 16). Cuando el río suena. . . ELESPECTADOR.COM.
<https://www.elespectador.com/bogota/cuando-el-rio-suena-article-485040/>

¿Qué es el IBOCA? (2021, Mar 25). <http://iboca.ambientebogota.gov.co/publicaciones/175/que-es-el-iboca/>

PTAR Salitre. (n.d.).

<https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/saneamiento/rio-bogota/ptar-salitre>

Guardino Solá, X. (2012). CALIDADDELAIREINTERIOR. <https://aqmlaboratorios.com/wp-content/uploads/2012/11/Calidad-del-aire-interior.pdf>