

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE UN CULTIVO MIXTO DE MICROALGAS
PARA LA DEPURACIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN DE DIESEL**

BRENDA DAYAN PERILLA PACHON

SANDRA CAROLINA RIOS HERRERA

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO**

Director

Felipe Correa Mahecha

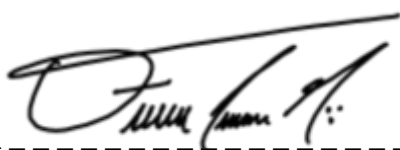
Ingeniero Químico

Msc. Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE
INGENIERÍA QUÍMICA BOGOTA DC**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN



Nombre Felipe Correa Mahecha

Firma del director



Nombre

Firma del presidente del jurado



Nombre Juan Andrés Sandoval

Firma del jurado



Nombre Juan Camilo Cely

Firma del jurado

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana de la Facultad de Ingenierías

Dra Naliny Patricia Guerra Prieto

Director de Programa

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICADORA

En primer lugar, a Dios por guiarme en el camino y encontrar una carrera que me llenara de alegría y satisficiera mi búsqueda de conocimiento, por brindarme las oportunidades y bendiciones necesarias para culminar esta etapa de mí proyecto de vida.

A mi familia por el apoyo moral, sentimental y económico que me brindaron a lo largo de mi carrera, quienes me han dado el amor, cariño y confianza a mis capacidades y sueños para culminar esta etapa de mi vida. A mi director de tesis el Msc. Felipe Correa por su apoyo, comprensión y dedicación en el proyecto y por último, a todas aquellas personas que aportaron y colaboraron en la elaboración del documento, con sus consejos, conocimiento y amor.

Brenda Dayan Perilla Pachón

En primer lugar, a Dios por permitirme conocer esta carrera y llenarla de bendiciones, brindándome oportunidades y soluciones a cada dificultad que se presentó en el camino. A mi mamá, por su cariño, paciencia y comprensión, siendo mi apoyo incondicional en cada paso. A mi compañera de proyecto Brenda Perilla por su compromiso, dedicación y apoyo durante la carrera y el desarrollo del proyecto. A mi director de tesis el Msc. Felipe Correa por su apoyo y dedicación como director, profesor y ser humano en este proyecto.

Sandra Carolina Rios Herrera

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente son exentos de la responsabilidad de los criterios e ideas expuestos en el presente documento. La responsabilidad es exclusiva de los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	13
1. GENERALIDADES	14
1.1 Planteamiento del problema	14
1.2 Antecedentes	16
1.3 Fuentes móviles generadoras de contaminantes atmosféricos	18
<i>1.3.1 Tipos de combustibles en Colombia</i>	18
1.4 Motores de combustión interna	21
<i>1.4.1 Partes de un motor de combustión interna</i>	21
1.5 Contaminantes generados por la combustión de motores diésel	24
<i>1.5.1 Compuestos de nitrógeno</i>	25
<i>1.5.2 Compuestos de azufre</i>	25
<i>1.5.3 Compuestos de carbono</i>	26
<i>1.5.4 Ozono troposférico (O₃)</i>	26
<i>1.5.5 Smog fotoquímico</i>	27
<i>1.5.6 Material particulado</i>	27
1.6 Normativa colombiana para emisión de contaminantes	28
2. MICROALGAS	33
2.1 Metabolismo de microalgas	33
<i>2.1.1 Mecanismo fotoquímico</i>	34
<i>2.1.2 Mecanismo de fijación del dióxido de carbono (CO₂)</i>	34

2.1.3 <i>Tipos de metabolismo</i>	36
2.2 Tipos de microalgas	36
2.2.1 <i>Chlorella sp</i>	39
2.2.2 <i>Spirulina sp</i>	40
2.2.3 <i>Scenedesmus sp</i>	40
2.3 Método de selección y sus criterios	41
2.3.1 <i>Criterios</i>	41
2.3.2 <i>Comparación (criterio vs criterio)</i>	43
2.3.3 <i>Matriz final de selección de familias a partir de los criterios tomados</i>	48
2.4 Medio de cultivo mixto y sus parámetros	49
2.4.1 <i>Temperatura</i>	50
2.4.2 <i>pH</i>	50
2.4.3 <i>Intensidad lumínica</i>	50
2.4.4 <i>Nutrientes</i>	51
2.4.5 <i>Salinidad</i>	51
2.4.6 <i>Fotoperiodo</i>	52
2.4.7 <i>Densidad celular</i>	52
3. METODOLOGÍA	53
3.1 Ubicación	53
3.2 Upstream	55
3.2.1 <i>Sistema de filtración de partículas</i>	56
3.2.2 <i>Sistema de Intercambio de calor</i>	57
3.3 Midstream	59

3.3.1 <i>Fotobiorreactores (FBR)</i>	61
3.4 Métodos de selección y sus criterios	63
3.4.1 <i>Criterios</i>	63
3.4.2 <i>Comparación (criterio vs criterio)</i>	64
3.4.3 <i>Matriz final de la selección del fotobiorreactor</i>	70
3.4.4 <i>Reactor seleccionado</i>	71
3.5 Sistema de intercambio de gases	73
3.6 Downstream	74
3.6.1 <i>Disposición final de la biomasa</i>	74
4. SIMULACIÓN Y DISEÑO DE PROCESO	80
4.1 Cinética de la reacción	81
4.2 Supuestos y simplificaciones	82
4.3 Simulación	84
4.4 Análisis	88
5. CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	105

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. <i>Productos desarrollamos por la empresa BiomiTech</i>	17
Figura 2. <i>Componentes de un motor de combustión interna.</i>	22
Figura 3. <i>Árbol normativo pertinente para el proyecto.</i>	47
Figura 4. <i>Ciclo de Calvin-Benson</i>	35
Figura 5. <i>Cuadro Familias de microalgas</i>	37
Figura 6. <i>Resultado matriz fijación de carbono</i>	46
Figura 7. <i>Resultado matriz intensidad lumínica</i>	47
Figura 8. <i>Resultado matriz producción de biomasa</i>	48
Figura 9. <i>Cuadro Ventajas y Desventajas de la ubicación del sistema</i>	54
Figura 10. <i>Diagrama de bloques del Upstream</i>	56
Figura 11. <i>Filtros de partículas y paredes del canal</i>	57
Figura 12. <i>Diagrama de bloques del Midstream</i>	60
Figura 13. <i>Cuadro Ventajas y Desventajas de los FBR</i>	61
Figura 14. <i>Gráfico resumen criterio intercambio de gases</i>	67
Figura 15. <i>Grafico resumen criterio intensidad lumínica</i>	68
Figura 16. <i>Grafico resumen criterio Recirculación</i>	69
Figura 17. <i>Grafico resumen criterio Dimensionamiento</i>	70
Figura 18. <i>Fotobiorreactor Tubular</i>	72
Figura 19. <i>Sistema de intercambio de gases</i>	73
Figura 20. <i>Diagrama de bloques Downstream</i>	74
Figura 21. <i>Diagrama de bloques de proceso general</i>	78

Figura 22. <i>Relaciones del Balance de masa</i>	79
Figura 23. <i>Ambiente de simulación #1</i>	84
Figura 24. <i>Ventana de especificaciones del intercambiador de calor</i>	85
Figura 25. <i>Ventana de especificaciones del fotobiorreactor</i>	86
Figura 26. <i>Ambiente de simulación #2</i>	87
Figura 27. <i>Ventana de condiciones del decantador</i>	88
Figura 28. <i>Cuadro Familias de Microalgas</i>	108
Figura 29. <i>Cuadro de criterios de microalgas</i>	112
Figura 30. <i>Cuadro criterios fotobiorreactores</i>	113
Figura 31. <i>Criterios de evaluación según escala thomas saaty</i>	116
Figura 32. <i>Suposiciones matematicas cálculo de flujo</i>	119
Figura 33. <i>Flujograma de desición de microalgas</i>	121
Figura 34. <i>Flujograma de desición de ubicación</i>	122
Figura 35. <i>Flujograma de desición de FBR</i>	123

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. <i>Resumen de valores Resolución 910 del 2008</i>	31
Tabla 2. <i>Resumen valores Ley 1205 de 2008</i>	31
Tabla 3. <i>Reducción del porcentaje de emisión de gases contaminantes según normativa Euro</i>	32
Tabla 4. <i>Matriz N°1 Criterios vs Criterios</i>	44
Tabla 5. <i>Matriz selección de familias a usar en el sistema</i>	49
Tabla 6. <i>Criterios vs criterios de selección del fotobiorreactor</i>	65
Tabla 7. <i>Matriz de decisión del fotobiorreactor</i>	71
Tabla 8. <i>Porcentaje de biofijación con respecto a los datos obtenidos en el simulador</i>	89
Tabla 9. <i>Comparación de volúmenes</i>	90
Tabla 10. <i>Matriz de cepas en función del criterio porcentaje de fijación de carbon</i>	116
Tabla 11. <i>Matriz de opciones de cepas en función del criterio intensidad lumínica</i>	117
Tabla 12. <i>Matriz de opciones de cepas en función del criterio producción de biomasa</i>	117
Tabla 13. <i>Matriz de opciones de fotobiorreactores en función del criterio sistema de intercambio de gases</i>	118
Tabla 14. <i>Matriz de opciones de fotobiorreactor en función del criterio intensidad lumínica</i>	118
Tabla 15. <i>Matriz de opciones de fotobiorreactor en función del criterio recirculación</i>	119
Tabla 16. <i>Matriz de opciones de fotobiorreactor en función del criterio dimensionamiento</i>	119
Tabla 17. <i>Cálculos del flujo inicial</i>	118
Tabla 18. <i>Balance de masa</i>	120
Tabla 19. <i>Cinética de la reacción y volumen del reactor</i>	120

RESUMEN

El uso de biotecnologías para la producción de productos de valor agregado ha venido cogiendo fuerza en los últimos años, debido a las problemáticas ambientales que día a día crecen, como el caso de la generación de gases de combustión, el cual al ser la causa principal del cambio climático, desencadenan la búsqueda, desarrollo y evolución de tecnologías, que permitan la reducción y/o eliminación de este tipo de contaminantes; dentro de esta búsqueda se resalta el desarrollo de procesos de biorremediación y generación de productos de valor agregado a través de la producción de biomasa microalgal.

Considerando que el proceso de combustión de Diésel es una de las mayores contribuyentes en la generación de gases efecto invernadero, se desarrolla un proyecto de investigación, el cual tiene como objetivo depurar los gases del tubo de escape generados por los motores Euro III y Euro IV en la flota actual de biarticulados de Transmilenio. El proyecto consiste en implementar un sistema sobre el vehículo (con un acople especial al tubo de escape), formado principalmente por un fotobiorreactor tubular, inoculado con un cultivo mixto de microalgas y un sistema de intercambio de gases por burbujeo; este equipo es alimentado continuamente por una corriente fría de gases emitidos (enfriada por un intercambiador de calor de tubos coraza), con el fin de depurar estos gases de combustión y producir biomasa.

El diseño del sistema se basó en 3 etapas fundamentales, Upstream (corrientes arriba), Midstream (corazón del diseño) y Downstream (corrientes abajo), determinadas a partir de una exhaustiva revisión bibliográfica, al mismo tiempo se seleccionó la metodología AHP para el desarrollo de las matrices de decisión, tanto de las cepas a ser usadas en el cultivo mixto, así como del fotobiorreactor. Por último, para la obtención de valores y datos requeridos para el modelamiento y simulación en el software elegido Super Pro Designer, se desarrolló una serie de cálculos en el programa EXCEL, para finalmente analizar y determinar la viabilidad del proceso.

Palabras Clave: Depuración de gases, Cultivo Mixto, Gases de combustión, Fotobiorreactores, Microalgas, Simulación, Biofijación de CO₂, Biomasa.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es la mayor consecuencia de la contaminación ambiental, la cual se ha venido presentando desde hace décadas en el planeta, evidenciando con mayor fuerza los impactos ocurridos en el último siglo [1], esto en consecuencia de la búsqueda incansable de la transformación de materias primas para la creación de productos de valor agregado; generando contaminantes nocivos no solo para el ser humano, sino también para el ecosistema. Estos contaminantes se pueden clasificar en tres tipos, sólidos, líquidos y gaseosos, el presente trabajo se enfocará en los últimos, específicamente en los gases producidos por la combustión de diésel en fuentes móviles [2].

El objetivo principal del presente trabajo, se basó en la depuración de los contaminantes nocivos causados por el exceso de los gases de efecto invernadero, siendo el de mayor relevancia el dióxido de carbono (CO_2), producido por la combustión completa del carbono durante la quema de un combustible [3], ya sea de una fuente fija (industria) o una móvil (vehículos); para el proyecto se tratan los últimos, al encontrarnos en un ciudad con un Sistema integrado de transporte masivo, como lo es Transmilenio. Cabe aclarar que debido a la versatilidad de buses disponibles en la flota actual, el proyecto se basara en los 1 313 biarticulados, siendo en su mayoría (aproximadamente el 80%) motores diésel Euro II y Euro III [4], [5].

En el proyecto a tratar se pretende diseñar un sistema de depuración de gases contaminantes, por medio de la aplicación de biotecnologías, en específico la inoculación de un cultivo mixto de microalgas, compuesto por cepas de alto rendimiento en este campo, como la *Chlorococcum*, la *Chlorella*, la *Scenedesmus*, la *Spirulina* y *Dunaliella* [6], en un fotobiorreactor tubular; la elección del cultivo y fotobiorreactor a usar, se determinó mediante la aplicación de la metodología AHP, la cual permite una comparación binaria de criterios, facilitando la valoración de estos [7].

Para finalizar, la viabilidad del diseño se estableció mediante la simulación en el software Super Pro Designer, el cual, gracias a su versatilidad, permite establecer dentro de su programación características y parámetros biológicos; este programa fue elegido a causa de la problemática ambiental del país, causada por la pandemia, llevando a la elaboración de un documento que permita una primera aproximación a la aplicación del diseño a escala industrial.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el potencial de uso de microalgas, para la depuración de gases generados por la combustión de diésel, en fuentes móviles.

Objetivos Específicos

Caracterizar los sistemas de microalgas, estableciendo los principales atributos que contribuyan a la depuración de los gases generados en fuentes móviles.

Establecer la ruta tecnológica del proceso, que permita cumplir los requerimientos legales mínimos de depuración, mediante la elaboración de una matriz de decisión.

Proponer un diseño para el proceso de depuración de gases en una fuente móvil, por medio del uso de microalgas.

1. GENERALIDADES

Con el presente proyecto se propone un método de depuración para la contaminación ambiental causada por la combustión de diésel de fuentes móviles; al ser contribuyentes en la generación de gases de efecto invernadero (GEI), como el CO_2 , CO , NO_x , SO_x , entre otros. Abordando esta problemática desde los conocimientos de la ingeniería química, en campos como la microbiología, el diseño de procesos, el diseño de experimentos, entre otros; logrando de esta manera fusionar en un diseño novedoso y práctico, microorganismos con mecanismos y tecnologías, brindando una base a futuros proyectos a mayor escala.

1.1 Planteamiento del problema

El cambio climático es la mayor consecuencia de la contaminación ambiental, la cual se ha venido presentando desde hace décadas en el planeta, evidenciando con mayor fuerza los impactos ocurridos en el último siglo [1], esto en consecuencia de la búsqueda incansable de la transformación de materias primas para la creación de productos de valor agregado; generando contaminantes nocivos no solo para el ser humano, sino también para los ecosistemas. Estos contaminantes se pueden clasificar en tres tipos, sólidos, líquidos y gaseosos [2], [8], el presente trabajo se enfocará en los últimos, específicamente en los gases producidos por la combustión de diésel en fuentes móviles.

El enfoque dado a este trabajo sobre los contaminantes generados por fuentes móviles, se dio gracias a los efectos nocivos del efecto invernadero, causado por el exceso de gases, siendo el de mayor importancia dióxido de carbono (CO_2) [9]; siendo el resultado de la consecuencia lógica de la combustión completa del Carbono, lo que quiere decir, que en cuanto mayor es su concentración, mejor es la combustión; pero el exceso del mismo causa graves daños a la atmósfera [9]. Para comprender el daño que representan estos gases en el planeta y la importancia de tratarlos, es primordial entender el concepto de “Gases de Efecto Invernadero”, los cuales a diferencia de lo que se piensa no son estrictamente nocivos para el planeta, sino que en un perfecto equilibrio, permiten retener el calor cerca de la superficie, logrando un calentamiento adecuado en el planeta Tierra y por lo tanto posibilitando la presencia de la vida [1]; los gases más conocidos son el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el metano y el óxido nitroso, entre más de veinte [2].

Así mismo, este trabajo también se orienta hacia la combustión producida por fuentes móviles del sistema integrado de transporte público de Bogotá, en especial los buses biarticulados y

articulados, que utilizan diésel como combustible y se rigen bajo la norma Euro IV [8], [10]; se logró, gracias al apoyo y orientación por parte de los profesores e integrantes del semillero “Procesos químicos para la integración de la economía circular en la industria” de la Fundación Universidad de América, la cual pretende ser un participante activo, tanto de la investigación como en la puesta en práctica de nuevas tecnologías que ayuden con el cambio climático en sus diversas formas.

Cabe aclarar que el tipo de contaminantes a tratar, aunque hacen parte importante en el efecto de cambio climático, no representan el porcentaje más alto de contaminación en la ciudad de Bogotá (esto se le atribuye a los camperos y camionetas) [11], pero si generan números considerables, en cuanto a la emisión de este tipo de gases; por ello, en el presente documento se quiere buscar una alternativa que contribuya a la depuración de dichas emisiones, previo a la implementación de más buses, a la apertura de nuevas estaciones o como se sabe la implementación del metro [10].

Sin duda alguna el aumento de restricciones, normativas y leyes que día a día se han implementado en el país, ha contribuido al aumento de estudios en este campo, provocando un interés creciente en las industrias, instituciones educativas y entidades gubernamentales, en el desarrollo de nuevas tecnologías que ayuden hacia una transición amigable a una economía sustentable. De los estudios mencionados de mayor impacto y eficiencia en el país, encontramos el tratamiento de gases de combustión de fuentes móviles, por medio de cultivos de microorganismos que los transforman en productos de interés agregado [12]; granjas solares que evitan la emisión de CO₂ [13]; la implementación de motores con filtros especiales, que permitan retener los contaminantes nocivos para su posterior desecho.

PREGUNTA GENERAL

¿Por medio de qué tecnología es posible restringir la emisión de gases contaminantes, generados por la combustión de fuentes móviles?

PREGUNTAS ESPECÍFICAS

¿Qué tipo de microorganismos cumplen con las características adecuadas, para la depuración de gases generados por la combustión de fuentes móviles?

¿Es posible por medio de una matriz, decidir la mejor ruta tecnológica a aplicar para la depuración de gases de combustión?

¿Es factible integrar a la ruta tecnológica propuesta, un cultivo de microalgas, mediante el acople de un fotobiorreactor a los demás sistemas?

1.2 Antecedentes

Los antecedentes que se presentaran a continuación se encuentran directamente relacionados con los aspectos de mayor relevancia para el proyecto, como lo son el uso de microalgas para la depuración, mitigación o purificación de gases de combustión, ya sea de fuentes fijas o móviles y de tecnologías y métodos novedosos en la industria para el tratamiento de los gases en mención, dando bases sólidas de proyectos exitosos puestos en marcha en la actualidad.

El primer antecedente a tener en cuenta es el proyecto de la empresa “*Biom iTech tecnología inspirada en la naturaleza*” la cual desarrollo una solución tecnológica con visión global para mitigar la contaminación ambiental causada por los gases de combustión de fuentes móviles, mediante un proceso de biorremediación producido por la fotosíntesis de microalgas [14]. Como solución a esta problemática y derivados de la misma, Biom iTech desarrollo *Bio Urban* un sistema de purificación de aire, el cual consiste en un “árbol artificial” de acero que en su interior contiene microalgas (desarrolladas por la empresa) capaces de transformar el aire contaminado en oxígeno [15].

En la actualidad tras varias investigaciones Biom iTech desarrollo 3 productos, conocidos como BioUrban 1.0, 2.0 y 3.0 (ver figura 1), los cuales se desarrollaron para solucionar necesidades diarias de la sociedad; el primer producto BioUrban 1.0 está diseñado pensando en interiores como hogar, escuelas, oficinas, entre otros, cuenta con una altura de 210 cm, diámetro de 25 cm, un peso de 120 kg y un caudal de aire de 255 m³/h [14]. El segundo diseño (BioUrban 2.0), es conocido como el pionero de la empresa al ser un sistema urbano y la inspiración del nombre dado a los productos, sus primeras instalaciones fueron ubicadas en las urbes principales de México, con el fin de capturar y transformar los gases generados por fuentes fijas adyacentes y en especial fuentes móviles; este diseño se conoce más comúnmente como “árbol artificial” por su estructura, cuenta con una altura de 4.2 m, diámetro de 2.75 m (en la parte más ancha), un peso de 1 tonelada y un flujo de caudal de 3 300 m³/h [15]. Por último, BioUrban 3.0 es el diseño más novedoso de la

empresa y considerado como la mejora de BioUrban 2.0, al incrementar su tamaño y la capacidad de transformación de contaminantes, es funcional tanto en las calles como en los alrededores de una empresa [14], [15].

Figura 1.

Productos desarrollamos por la empresa BiomiTech



Nota. Productos desarrollados como solución a la contaminación por la empresa BiomiTech. Tomado de Biomitech – Tecnología inspirada en la naturaleza.” Vía web <http://biomitech.org/>.

El segundo antecedente, da a entender como la arquitectura y la construcción son un campo que afecta de manera directa al cambio climático por la generación de gases de efecto invernadero a la hora de llevar a cabo el desarrollo de sus proyectos, ya que los procesos y operaciones con los cuales se realizan estos proyectos urbanos, contribuyendo en un 30% anual en la generación de gases contaminantes; Por otro lado, la crisis energética y el cambio climático generado por la contaminación han conllevado al estudio e implementación de biotecnologías en el área arquitectónica, con el fin de reducir el porcentaje de generación de gases emitidos por la industria, provocando un desarrollo sostenible, mediante la creación arquitectónica de “ciudades verdes” [16], [17].

Dando paso al desarrollo de proyectos innovadores como “la casa o edificio BIQ (Bio Intelligent Quotient)”, la cual consiste en una “estructura verde” que implementa el uso de energía solar y microorganismos dentro de la misma configuración, potencializando tecnologías que generen bioenergía y constituyan un cambio en la forma de percibir el siglo XXI. Este proyecto fue llevado a cabo en Hamburgo Alemania y funciona principalmente implementando en las fachadas Fotobiorreactores Tubulares Empacados (o PBR por sus siglas en inglés) de placa plana y vidrio, donde se cultivan microalgas encargadas de biofijar CO₂ y captar la luz solar, produciendo biogás

y calor. Desarrollando un edificio auto-sostenible, que consta de cinco plantas, 129 paneles acoplados en las fachadas laterales, suministro de CO₂, nutrientes, control de temperatura y circulación del líquido; requerimientos necesarios de un cultivo óptimo, para la posterior recolección y transporte de la biomasa filtrada, generando electricidad por medio del sistema automatizado [16], [17].

1.3 Fuentes móviles generadoras de contaminantes atmosféricos

En Colombia gracias al libre comercio, ha sido posible estar en contacto con productos y conceptos novedosos en diversas ramas como la agronomía, informática, medicina, así como la automotriz [18]; en esta última haciendo principal énfasis en el auto y en las diversas partes que lo componen y tienen efecto sobre él, como lo son las autopartes y combustibles. Razón por la cual la investigación, desarrollo y creación de alternativas se encuentra en un constante crecimiento, brindando opciones en el mercado para el consumidor; en el presente apartado y dando introducción a la primera parte del proyecto en cuestión, se hablará de los tipos de combustibles utilizados en Colombia y la razón por la cual se eligió el Diésel como generador de gases contaminantes para su depuración, además de profundizar en los contaminantes generados por este y el impacto que tienen en la salud, fauna, flora y atmósfera [2].

1.3.1 Tipos de combustibles en Colombia

En la actualidad existen aproximadamente 12 empresas encargadas de la distribución de combustibles líquidos y gaseosos en Colombia, como Biomax, BRIO, Petrobas, Petromil, entre otras; siendo Exxon (opera bajo Esso y Mobil), Chevron (Texaco) y Terpel las líderes de este campo en el país [19]. Estas empresas además de la distribución de combustibles para autos, aviones o carga pesada, han incursionado en actividades complementarias como la producción de lubricantes, aceites refrigerantes, etc. A continuación, se presentará una breve descripción de los combustibles más utilizados en Colombia.

1.3.1.a Gasolina. La gasolina es un hidrocarburo líquido producido en la refinación del petróleo crudo, específicamente en el proceso de obtención de nafta de destilación directa, siendo la fracción líquida más ligera obtenida del proceso; Es una sustancia inmisible con el agua y su calidad se distingue a partir del octanaje que posea [20] (entre mayor su octanaje mejor su calidad), es utilizada como carburante en motores de combustión interna con encendido de chispa, la cual al ser una mezcla de muchos hidrocarburos varía su composición entre países, regiones e incluso

de pozo a pozo [20]. Es considerada tóxica pero no venenosa para el ser humano, ya que su efecto es nocivo en grandes cantidades o exposición prolongada.

La característica principal por la cual se regula la gasolina, es el índice de octanaje o número de octano, el cual indica la temperatura y presión máxima a la que puede ser sometido el combustible al mezclarse con el aire antes de la ignición, también se conoce como la resistencia del combustible a la auto-ignición [21], [22], [23]. Así mismo, existen varios tipos de gasolina, que se pueden clasificar según esta característica, en Colombia son usadas dos tipos: la extra y la corriente, la primera es de mayor precio debido a su alto octanaje (aproximadamente 92 octanos) [21], requiere de altas temperaturas y por lo tanto más dura de encender, en cambio la gasolina corriente posee un octanaje inferior (aproximadamente 87 octanos) [22] requiriendo menor temperatura y presión al momento de la ignición y menor tratamiento de purificación, por estas características es de menor precio y de más fácil acceso.

1.3.1.b A.C.P.M o Diésel. Es conocido como el gasóleo extraído del petróleo, se denomina aceite de combustible para motores por sus siglas A.C.P.M en Colombia o diésel en Latinoamérica, ya que en otras partes se denomina gasóleo al combustible y diésel al motor [24]. Es una mezcla variada de hidrocarburos, obtenida mediante la destilación atmosférica fraccionada del petróleo y una refinación sencilla, conteniendo concentraciones de azufre y minerales más altas y por lo tanto su producción y comercialización es mucho más económica [25].

En general se caracteriza por ser más pesado que la gasolina al tener componentes más densos y complejos, lo cual implica que sea más difícil de quemar y por lo tanto genera mayor material particulado [24], pero permite el uso en automotores o máquinas de mayor requerimiento energético como camiones, trenes, aviones, tractores o en el caso a tratar Transmilenio en la ciudad de Bogotá [25].

Otras de las características a resaltar para el diésel en Colombia es el número de cetano, el cual determina la facilidad que tiene el combustible para encender de manera espontánea el motor (entre mayor sea el número de cetano más fácil el encendido) [23]; en Colombia, ECOPETROL la empresa encargada del yacimiento, refinamiento y distribución de combustible en el país, genera 3 tipos de diésel [26]: Diésel corriente B2/B4 el cual es una mezcla de hidrocarburos y biodiesel con un número de cetano mínimo de 43 y regido bajo la norma Euro IV [24]; Diésel extra B2E/B4E el cual tiene una composición prácticamente igual que el diésel corriente, con la única

diferencia en el número mínimo de cetano (siendo para este de 45) [27] (ficha técnica tomada de Portal ECOPETROL); y por último, el Diésel Marino el cual es una mezcla de hidrocarburos con un número de cetano mínimo de 40 y es usado principalmente en embarcaciones marinas [26].

1.3.1.c Gas natural. Es una mezcla de gases obtenida en los yacimientos petrolíferos, se halla en la primera fase de extracción y está compuesto principalmente por metano (de un 75 a 95%) y el restante por una mezcla entre etano, propano, butano, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, helio y argón [28]. Inicialmente era quemado como residuo en la extracción de petróleo, pero luego de encontrar solución al problema de almacenamiento y distribución del mismo, se logró hacer provecho de su gran capacidad calorífica[29].

En la actualidad y gracias al avance tecnológico en la rama de los combustibles, existe el gas natural de uso doméstico y el gas natural de uso industrial como combustible [28], [29], para los temas a tratar se hará énfasis en el segundo. El gas natural de uso industrial o más conocido como gas natural vehicular es uno de los combustibles que a través de los años ha tomado mayor relevancia en la industria automotriz en Colombia, debido a su capacidad calorífica y residuos poco contaminantes [30], [29], [31]. En Colombia existen dos tipos [29],[32]: el gas natural licuado o GNL por sus siglas, el cual es el gas natural que ha sido enfriado a -162°C mediante el proceso de licuefacción logrando una reducción en el volumen de casi 600 veces al pasar a estado líquido, facilitando su transporte y distribución [32]; el segundo tipo que es posible encontrar es el gas natural comprimido o GNC, el cual es más eficiente y menos contaminante que los carburantes líquidos (entre un 30 a 60% menos), además de caracterizarse por su forma de almacenamiento [33], ya que habitualmente es comprimido en cilindros especiales que soportan altas presiones logrando la eficiencia energética requerida en espacios reducidos.

1.3.1.d Biodiesel. Es un tipo de combustible de origen animal o vegetal (especialmente de aceites) mezclado con alcohol y un catalizador [34]; en Colombia la mezcla más común es de aceite de palma con diésel “puro” y como catalizador hidróxido de sodio o potasio, esta mezcla comúnmente se compone de 12% de biocombustible (aceite + alcohol + catalizador) y 88% diésel [34]. Este aceite es el más utilizado debido a los altos rendimientos por hectárea que presenta frente a otros [34], tanto por la duración de la planta, como por la demanda alimenticia del mismo. En la mayor parte de Latinoamérica su nombre se denomina por una B seguida del porcentaje de mezclado del biocombustible (ej.B12) [34].

Los combustible afines e iguales han tenido un aumento en la demanda en los últimos 10 años, gracias al desarrollo de investigaciones y avances tecnológicos en este campo, brindando una posible solución a la demanda energética que se ha venido presentado en la última década; sin embargo aún no ha sido posible alcanzar precios competitivos con respecto a sus similares como el ACPM o mezclas de diésel, puesto que presenta problemas de sostenibilidad, al poner en riesgo la seguridad alimentaria a largo plazo, impidiendo su masificación en el mercado [34], [35].

Luego de dar una definición, mostrar las características más relevantes, ventajas y desventajas de los combustibles usados en Colombia y teniendo en cuenta que en un corto plazo de aproximadamente 2 años Transmilenio terminara de implementar en la ciudad de Bogotá la nueva flota de buses articulados y biarticulados [36]; los investigadores decidieron tomar como caso de estudio el Diésel, al ser uno de los principales combustibles utilizados en dicha flota (a parte del gas natural) y tener un crecimiento de implementación en el mercado en los últimos 10 años [23]. Por tales motivos en los siguientes ítems del capítulo, el enfoque se realizará hacia dicho combustible.

1.4 Motores de combustión interna

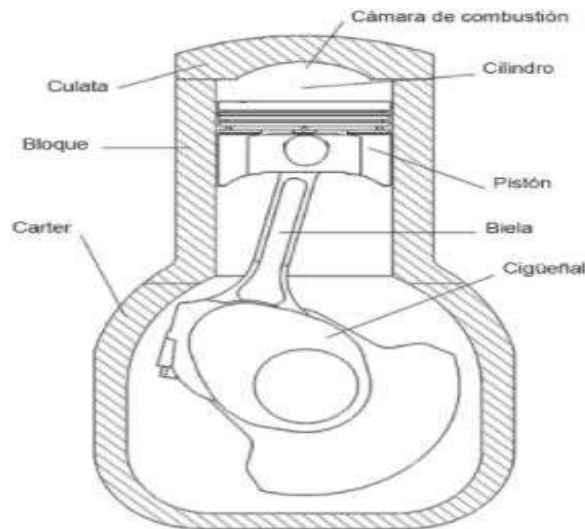
Para continuar el desarrollo del capítulo es preciso entender primeramente el funcionamiento de un motor de combustión interna, el cual a grosso modo es un mecanismo térmico que libera parte de la energía obtenida en trabajo, en el caso a tratar se obtiene movimiento, gracias a la quema de un combustible (para el caso diésel) [9]. Para entender a cabalidad lo mencionado, a continuación, se presenta un pequeño desglose de las partes fundamentales del motor, así como las ventajas y desventajas del mismo.

1.4.1 Partes de un motor de combustión interna

Los motores de combustión interna constan de ocho partes importantes y dos o cuatro procesos básicos principales (dependiendo si es otto o diésel), los cuales constituyen el ciclo termodinámico del mismo. En la figura 1, se puede observar los componentes básicos de un motor [37].

Figura 2.

Componentes de un motor de combustión interna.



Nota. Representa los 8 componentes fundamentales de un motor de combustión interna. Tomado de Desempeño y emisiones de motor de combustión interna con combustible dual Diésel-Gas Natural. Trabajo Teórico Experimental, formato PDF.

Al observar en la figura 1 un boceto de los componentes de un motor de combustión, se proseguirá a dar una definición corta del funcionamiento e importancia de estos:

1.4.1.a El bloque del motor o monoblock. Es la parte más grande del motor, en este se encuentran los pistones, la culata y los circuitos de lubricación y refrigeración [38],[39]. Su diseño depende de la cantidad de cilindros que contenga, llegando a ser un bloque (monobloque), 2 bloques (bibloque), hasta los seis bloques. Por lo regular se fabrican con aleaciones de hierro y aluminio, capaces de soportar las altas temperaturas y el desgaste [38].

1.4.1.b La culata. Es el elemento mecánico encargado de cerrar el extremo superior de los cilindros, evitando pérdidas de combustión en el interior; conteniendo en su anterior además otras piezas fundamentales para el funcionamiento del motor como el pistón, el cigüeñal, entre otras [38]. En la actualidad existen diversas culatas, las cuales varían de acuerdo a los requerimientos del consumidor, ya sea en forma o material [39].

1.4.1.c Cilindros. Es la cavidad de forma cilíndrica por donde los pistones se desplazan, al ser propulsados por la energía desprendida de la combustión, realizando los procesos básicos de admisión, compresión, expansión y escape [38], [39]; Son fabricados con fundiciones de acero aleadas con otros metales, logrando una pared totalmente lisa y con mayor resistencia al desgaste [38].

1.4.1.d Cámara de combustión o cámara de explosión. Es el espacio entre los cilindros y la culata, en donde gracias al recorrido ascendente del pistón se comprime la mezcla aire-carburante produciendo la combustión del motor [39]. Debido a la importancia que la cámara tiene en el funcionamiento del motor es posible encontrar en el mercado múltiples diseños, que buscan una combustión homogénea y sin riesgo de detonación [39].

1.4.1.e El pistón o embolo. Es una de las piezas más importantes del motor al interactuar de manera directa con el fluido, modificando su volumen o presión para crear movimiento [39]; es el encargado de darle fuerza a la biela a partir de la explosión producida por la combustión [38]. Están hechos principalmente de aluminio con aleaciones metálicas y acompañados de anillos con flexibilidad para ser instalados en los cilindros [39].

1.4.1.f La biela. Es una pieza fundamental del motor, al transformar movimiento rectilíneo en uno de rotación, o viceversa [39]; Es la pieza encargada de transmitir la fuerza recibida del pistón al cigüeñal y por lo tanto la responsable de que el vehículo se mueva, por tal motivo debe ser fabrica en materiales resistentes pero ligeros, habitualmente en el mercado se encuentran de acero al cromo-molibdeno con silicio y manganeso, acero al cromo-vanadio o acero al cromo-níquel.

Es posible diferenciar en esta pieza 3 partes cabeza, cuerpo y pie; la cabeza es la parte que gira sobre el codo del cigüeñal, el cuerpo asegura la rigidez y el pie es el encargado de unirla con el pistón por medio del bulón [38].

1.4.1.g El cigüeñal. Se considera la pieza más importante del motor junto con la biela y el pistón, al ser el encargado de transformar el movimiento producido por la biela en movimiento rotatorio [38]. Es considerado un eje provisto de manivelas y contrapesos con orificios de lubricación, al ser una pieza diseñada para soportar grandes esfuerzos, se fabrica de acero al cromo-molibdeno con cobalto y níquel [37].

1.4.1.h El cárter. Es conocido como la cubierta que recubre y protege piezas importantes, en el caso del motor de combustión interna es la parte inferior del motor en donde se ubica el cigüeñal y parte de la biela [38], [39]. Es una pieza de suma importancia, ya que resguarda el aceite de lubricación, permitiendo mantener cada pieza lubricada para su óptimo desarrollo, además de evitar desgastes prematuros [39]. Generalmente se fabrica de aluminio con pequeñas porciones de otros metales, que permiten mantener al lubricante en una temperatura óptima [38].

1.5 Contaminantes generados por la combustión de motores diésel

Al usar el diésel como combustible ya sea en fuentes fijas o móviles, genera una compleja mezcla de emisiones nocivas tanto para la atmósfera como para los seres vivos; siendo la fase gaseosa predominante a la líquida (agua) y a la sólida (material particulado) [2]. En el presente ítem se hablará de los contaminantes producidos por los motores diésel en la flota de Transmilenio, en especial buses biarticulados, al tener mayor capacidad de pasajeros, menos costos de mantenimiento y nomina [4], [5], [40]; en los cuales, además se observa que los buses pertenecientes a EURO II y III son los buses con menor control de emisiones, excediendo los porcentajes de gases emitidos bajo la normativa e incumpliendo con los cambios en tecnologías [5], [40].

A continuación, se presentará una descripción de los contaminantes de mayor importancia generados por un motor diésel, con mayor énfasis en los gases emitidos por los 757 articulados y los 1 313 biarticulados de la flota de Transmilenio, siendo en su mayoría (aproximadamente el 80%) motores diésel Euro II y III [5],[40].

De acuerdo a bibliografía es posible evidenciar que se genera mayor cantidad de contaminantes en las emisiones de un motor tipo diésel que por uno tipo Otto [2], [23], [9]; sin embargo, los contaminantes producidos por el diésel, contrario a las creencias no son en su totalidad nocivos, un ejemplo de esto es la pequeña conversión que tiene el N_2 del aire en NO_x [2], haciendo casi imperceptible su contaminante en el ambiente, así como la producción de CO (monóxido de carbono). Pese a esto, a diferencia del Otto, en la quema de diésel se produce hollín y material particulado, formando un aglomerado que permite la adhesión de hidrocarburos, agua, sulfatos, azufre, entre otros; impidiendo la separación entre las sustancias y dificultando la recuperación de sustancias aprovechables [2].

A continuación, se presentará una descripción de los contaminantes de mayor importancia generados por un motor diésel, con mayor énfasis en los gases emitidos por los 757 articulados y los 1 313 biarticulados de la flota de Transmilenio, siendo en su mayoría (aproximadamente el 80%) motores diésel Euro II y III [5],[40].

1.5.1 Compuestos de nitrógeno

En el caso a tratar, se tendrán en cuenta compuestos como NO, NO_x, NO₂ y N₂; los cuales se generan al interior del motor al alcanzar altas presiones de hasta aproximadamente los 1000-2000 Bar y temperaturas entre los 1000-1200 K [9], generando que reaccione el oxígeno y el nitrógeno del aire, el cual al ser uno de los contaminantes de mayor generación en la combustión de diésel (entre un 66 y 68%) [8] se debe analizar con especial énfasis, además de ser uno de los principales precursores del ozono troposférico [2] y llegando a ser un posible inhibidor del cultivo mixto a utilizar, al superar porcentajes permitidos de la cepa predominante [41]. Destacando que los valores a tener en cuenta en el presente documento se analizaron como grupo de NO_x y no como variaciones que puedan llegar a presentarse en la combustión, debido a que los valores reportados por el Ministerio de Ambiente a Transmilenio para el 2018, fueron de 16 385 g NO_x/ km recorrido día para flota biarticulada con promedio entre tecnología Euro IV y V [8], [42].

Para finalizar y como se explica de manera más detallada en el ítem 1.5.3 Compuestos de carbono, 1 kg de N₂O equivale a 310 kg de CO_{2e} [43].

1.5.2 Compuestos de azufre

Cuando se habla de compuestos de azufre se suele hablar de SO₂, H₂S, H₂SO₄, o sulfuros (SO_x), la cantidad y proporción de aparición depende directamente de la calidad del combustible, por lo que generalmente se presenta una mayor producción, en los motores diésel que en otros [2]; normalmente en una combustión completa e “ideal” de un motor diésel se produce aproximadamente 5% de este tipo de contaminantes. Para el caso a tratar se optó por los valores dados por el Ministerio de Ambiente de acuerdo a los monitoreos tomados por el departamento de calidad de aire al 2018 para la flota de biarticulados de Transmilenio, generando 5,50 x10⁻⁸ g SO₂/km recorrido día [8], [42]; dicho lo anterior los contaminante mencionados no serán tratados en el proyecto, al no presentar alto riesgo de contaminación al cultivo [41], esta aclaración se explicara con mayor profundidad en el capítulo 2 “Microalgas” y el 3 “Metodología”. Por último,

el mayor efecto causado por la emisión de estos contaminantes a nivel atmosférico, es la generación de lluvia ácida [2].

1.5.3 Compuestos de carbono

Principalmente tomados como CO, CO₂, CH₄ o hidrocarburos residuales, los cuales son producidos por la combustión incompleta del combustible, desgaste de los neumáticos y calentamiento del motor [2]. De acuerdo al tipo de combustible a utilizar, la toma de emisiones de contaminantes por compuestos de carbono varia, en el caso del Diésel generalmente se toma como emisiones de CO o CO₂ [44], en el caso a tratar se tomarán las emisiones de CO₂, al ser el alimento principal del cultivo a utilizar [41]. Cabe destacar que no todos los compuestos de carbono son nocivos para el ser humano, sino el exceso de la exposición a estos, los cuales generan sustancias altamente tóxicas que impiden el transporte de la hemoglobina, contribuye en gran medida al calentamiento global y a la formación de contaminantes secundarios, que al igual que los compuestos de nitrógeno generan ozono troposférico y son grandes contribuyentes del efecto invernadero [2], [44].

Los valores a tener en cuenta como alimento para el cultivo fueron tomados en base a los contaminantes de CO₂ y de CO producidos por vehículos diésel públicos, representados por biarticulados [45]; el valor base hace referencia al 42% de las emisiones totales de este contaminante, siendo para el CO₂ 0,0021 g CO₂ / km recorrido día y para el CO 2,56x10⁻⁵ g CO/km recorrido día [8] [45].

Además de esto se tendrán en cuenta los valores mencionados de CO_{2e} o dióxido de carbono equivalente, en los demás contaminantes mencionados; esta sigla es una medida que expresa en términos de CO₂ los efectos causados a la atmósfera por parte de otros gases de efecto invernadero, como el CO₂, CH₄, N₂O y gases fluorados [43]. En el caso del carbono, 1 tonelada de carbono equivale a 3,667 toneladas de CO_{2e} [43].

1.5.4 Ozono troposférico (O₃)

Es el contaminante secundario de origen fotoquímico más importante luego del smog, producido por la reacción entre la radiación solar que incide en las capas bajas de la atmósfera y los NO_x, CO, O₂ e hidrocarburos [2]. Para el contexto a trabajar se hablará exclusivamente del ozono troposférico de origen antropogénico, ya que los gases generados no contribuyen a la formación

ni del ozono estratosférico, ni el causado por efectos naturales como la erupción volcánica, incendios forestales, entre otros [2]. Es de gran importancia resaltar los efectos causados por este tipo de contaminantes, tanto para el ser humano, como a la fauna, flora y entorno aledaño, al causar graves problemas respiratorios, afectaciones a la visión, así como afectaciones fitotóxicas a altas concentraciones (como en el caso de las grandes ciudades) y una contribución significativa al calentamiento global [2]. En la actualidad gracias a los avances tecnológicos que se han presentado para el uso de combustibles diésel, los contaminantes secundarios como el O₃ no son tenidos en cuenta en inventario de emisiones, al presentar valores casi imperceptibles [1].

1.5.5 Smog fotoquímico

Generado por la aparición de contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos y oxígeno, en presencia de los rayos solares (de fuerte sol) y poco viento [2]. Es la forma en que se presenta el ozono troposférico en capas bajas, variando desde el color gris hasta negro y con tonos rojizos; resaltando que esta forma de ozono es una anomalía y por lo tanto genera mayores afectaciones a corto plazo, tanto a la comunidad produciendo problemas de salud (en especial para el sistema respiratorio), así como al entorno cercano, al degenerar la fauna y flora aledaña [1], [3]. Este tipo de contaminante es común encontrarlo en motores diésel (no en Otto), debido a las impurezas que el combustible posee, la cantidad liberada de este contaminante a la atmósfera por este tipo de fuente móvil varía de acuerdo a la pureza, aunque aproximadamente por la combustión de un motor diésel es de menos del 0.5% [2]. Por lo anterior y al no presentar una variación importante dentro del cultivo de microalgas, en el presente proyecto no se tendrá en cuenta este contaminante dentro del análisis de materia.

1.5.6 Material particulado

Este tipo de contaminante es producido de 10 a 20 veces más en un motor tipo diésel que uno tipo Otto [2], se encuentra compuesto principalmente por cenizas y partículas de carbono, en las cuales se adsorben compuestos orgánicos, partículas sulfatadas, nitradas, así como amonio, cloro, plomo, entre otros, en diferentes proporciones dependiendo de la pureza del combustible, el funcionamiento del motor y la forma de inyección. Este tipo de emisión al ser contaminantes con partículas de tamaño reducido (< a 10 ppm) [2] su ingestión por vía oral, respiratoria o visual es más fácil, generando afectaciones de manera directa y a menor plazo a los sistemas involucrados;

además de la creación de películas y afectación a la flora que se adhieren en superficies aledañas [2]. Cabe destacar que debido al tamaño de estas partículas su control, reducción y eliminación es de mayor complejidad (a diferencia de otros contaminantes), haciéndolas un contaminante importante a tener en cuenta para el tratamiento de los gases mencionados, lo que se podrá observar en el capítulo 3 del presente documento. Este contaminante para el caso de diésel es tomado generalmente como material particulado grueso (PM₁₀), debido a que contiene partículas inferiores a los 10 µm (micrómetros) de diámetro y delgado o fino (PM_{2.5}), el cual reúne partículas inferiores a las 2.5 micras de diámetro [46], para el balance se tendrán representados con valores de 0,047 y 0,043 g X /km recorrido día [8] [42].

1.6 Normativa colombiana para emisión de contaminantes

En Colombia debido a la implementación de diversos combustibles en fuentes fijas y móviles en la última década y gracias a la conciencia ambiental generada, se ha logrado implementar normativas oficiales y no oficiales que regulen la emisión de sus contaminantes a la atmósfera, en el presente ítem se hablará de las leyes, resoluciones, decretos y normas que protegen a todo ser viviente (humano, fauna y flora) en el país, de los efectos nocivos que los gases emitidos por el diésel llegan a causar a la salud [47], [48].

El control de las emisiones se verá principalmente enmarcado por la resolución 910 del 2008 (con las actualizaciones pertinentes de la resolución 1111 de 2013) [47], en la cual se establecen los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres, en especial el artículo 8, en el cual se trata a mayor profundidad, particularidad y rigurosidad los contaminantes provocados por los motores diésel en cualquier fuente móvil, considerada como vehículo automotor, para el proyecto se tomara como referencia los valores dados para los autos modelo 1998 y posterior (35% de opacidad) [47] (ver tabla 1 de la resolución 910); teniendo en cuenta que los valores de la presente norma son dados en porcentaje de opacidad. Es importante además considerar el párrafo que establece que a partir del 2010 los modelos de auto de este año en adelante deben garantizar un máximo de emisión del 80% del valor establecido para autos de 1998 [47].

La mencionada resolución trata también temas como la certificación de emisiones de opacidad (artículo 12), las cuales deben estar certificadas y autorizadas por entes pertinentes que permitan la libre circulación de autos con emisiones adecuadas [47]. Así como las sanciones al

incumplimiento del artículo 8, tratadas en el artículo 17 “Emisiones visibles en vehículos diésel”. Finalmente, como artículo a tener en cuenta se resalta el 22 “Límites máximos de emisión permisibles para vehículos diésel”, en el cual se trata los máximos niveles de emisión a partir de autos modelo 2010, en especial lo referente a las tablas 16 y 18, las cuales se centran en autos pesados sometidos a pruebas americanas y europeas [47].

Existen otras normas pertinentes a mencionar como el caso de la ley 1205 de 2008, conocida como la “Ley de Diésel” [48] en la cual se determinan los valores de azufre máximos permitidos en autos livianos (carros, camionetas, etc.) y en pesados (tipo Transmilenio) con proyección hasta diciembre del 2012; mencionando al mismo tiempo los entes encargados de regular las emisiones, tratamientos, almacenamiento y distribuciones de este, así como las sanciones correspondientes al incumplimiento de dicha ley [48]. Declarando la proyección en la mejora del combustible en términos de azufres emitidos hasta el 2012 [48]. Al mismo tiempo trata la regulación de la calidad de diésel para mejorar el nivel de vida de las personas [48]. En el caso a tratar y teniendo en cuenta que el combustible principal a tratar es el diésel la ley mencionada se tomará en su totalidad, ya que cada artículo presentado es relevante para el proyecto.

En el país se tienen presentes para el uso, regulación y control de combustibles diésel diversos tipos de documentos no incluidos en decretos y normas, como protocolos, convenios y similares, que brindan un panorama normativo global, que, a pesar de no ser acatado en su totalidad en el país, gran variedad de empresas está en el proceso de implementarlas para tener un mayor reconocimiento internacional, a continuación, se hablará de las relevantes con respecto a Transmilenio.

El primer documento con peso internacional a tener en cuenta es el Protocolo de Montreal, el cual surgió como medio de acción del “Convenio de Viena” [49], siendo el primer tratado ambiental multilateral con acogimiento mundial, en su inicio en 1987 fue firmado por 46 países, entrando en vigor el primero de enero de 1989 [49]. Tiene como objetivo reducir y eliminar la producción y consumo de sustancias responsables (Clorofluorocarburos-CFC y SAO-Sustancias que Agotan la capa de Ozono) del agotamiento de la capa de ozono. Este tratado fue firmado por Colombia en 1992, entrando en vigencia desde diciembre de 1993, logrando la creación de la UTO (Unidad Técnica de Ozono) entidad encargada de la implementación y control del protocolo [50].

En sus casi 30 años de creación e implementación ha logrado eliminar con éxito más del 98% de las SAO controladas, como lo son Clorofluorocarbonos (CFC), Hidroclorofluorocarbonos (HCFC), Halones y bromuro de metilo; logrando a su vez la ratificación en 196 países (al 2017) incluyendo las grandes potencias del mundo [50], [49].

El segundo documento a tener en cuenta para Colombia es el “Acuerdo de Paris” el cual es uno de los hitos de mayor relevancia, creado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) en 2015 y con vigencia en el país a través de la ley 1844 de 2017; tiene efectos relevantes para el estado colombiano, al estar comprometido con metas muy específicas en dos ítems importantes, reducción de gases de efecto invernadero (GEI) y adaptación de los efectos del cambio climático. Colombia hace parte del grupo mayoritario que reafirma su compromiso por el bien ambiental, desarrollando medidas estratégicas principalmente a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [51], [52].

Los compromisos adoptados por Colombia fueron: reducir el 20% de emisiones de GEI para el 2030, teniendo como base el inventario de emisiones 2010 y aumentar en un 30% la reducción de sus emisiones de GEI, con recepción de fondos para tal fin [52]. El cumplimiento del acuerdo en el país es logrado gracias a la implementación del “Plan Nacional de Desarrollo” (PND), el cual mediante la fijación de programas, inversiones y metas, permite evaluar los resultados garantizar la transparencia en el manejo del presupuesto [53].

Otra norma de importante adición al marco legal, es aquella que reúne la normativa ambiental europea, conocida como normas Euro (de la I a la VI), las cuales, a pesar de no encontrarse vigentes de manera legítima en el país, son de gran importancia y exigencia a nivel mundial, ya que regulan los requisitos de emisiones para motores, innovando día a día en tecnologías menos contaminantes y más amigables con el medio ambiente. El número que acompaña las siglas (EURO) indica la generación del motor y el nivel de contaminación que este puede llegar a generar al ambiente, si es ligero se determina con números cardinales y si es pesado con números romanos; en Colombia aún se presentan problemas en la aplicación de este grupo de normas, debido a que los combustibles a utilizar no se encuentran tratados hasta los niveles adecuados para este tipo de motores [54]. En el país se ha establecido que al 2023 las fuentes móviles con motores diésel deben cumplir con los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes correspondientes a tecnologías Euro VI o superiores [54]. El caso a tratar (Transmilenio) cuenta dentro de su flota con

buses norma Euro II, III, IV y V, siendo en su mayoría Euro II y III [40], los cuales tienen un control de emisiones menor a los restantes, generando mayores emisiones nocivas a la población y a la atmósfera, destacando de esta manera la importancia de minimizar el impacto de estos gases nocivos.

Ya para finalizar, debido a que la captura y medición de gases en un entorno abierto es una tarea engorrosa, las pruebas generalmente se realizan en espacios cerrados, en los cuales es más sencillo captar y medir este tipo de contaminantes; permitiendo a su vez una ventilación adecuada del lugar, ya que la falta de oxígeno genera mayor producción de CO, modificando los valores reales [2]. A continuación, se presentará una serie de tablas en modo de resumen de normativas en Colombia:

Tabla 1.

Resumen de valores Resolución 910 del 2008

<i>Lugar en la Resolución/ Criterio analizado</i>	<i>Artículo 8 (Vehículos modelo 1998 >)</i>	<i>Artículo 8 (Vehículos modelo 2010 >)</i>	<i>Artículo 17 (Escala de Ringelman)</i>
Opacidad (%)	35	28	-
Densidad aparente de humo (Patrón)	-	-	Patrón #4

Nota. Resumen de valores pertinentes para el proyecto de la resolución 910 del 2008, con la ubicación dentro de la resolución. Tomado de “Resolución 910 de Junio 2008”, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Versión PDF.

Tabla 2.

Resumen valores Ley 1205 de 2008

Lugar en la norma / Criterio analizado	Parágrafo 1 (SITM, 1 de enero 2010)	Artículo 4 (Sanciones monetarias)
Niveles de azufre (ppm azufre)	50 o <50	-
Sanción monetaria por incumplimiento (smlmv)	-	De 10 000 a 50 000

Nota. Resumen de valores relevantes Ley 1205 de 2008. Tomada de “Ley No 1205 Por medio de la cual se mejora la calidad de vida a través de la calidad de diésel y se dictan otras disposiciones”. Congreso de Colombia. Vía PDF.

Tabla 3.

Reducción del porcentaje de emisión de gases contaminantes según normativa Euro.

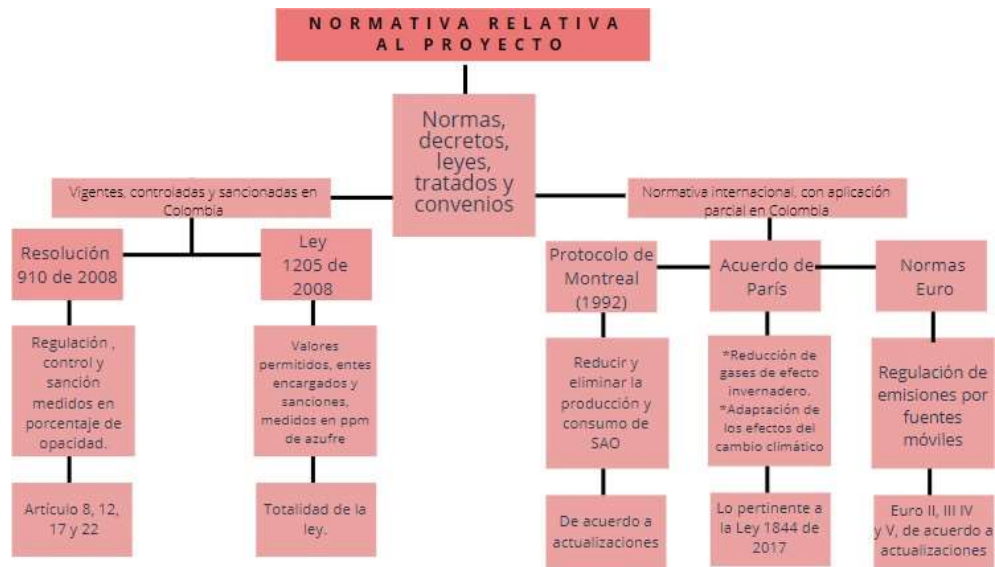
<i>Norma / Contaminante medido</i>	<i>Euro II</i>	<i>Euro III</i>	<i>Euro IV</i>	<i>Euro V</i>
NOx (% de reducción)	-61	-72	-81	-89
HC (% de reducción)	-69	-81	-87	-89
CO (% de reducción)	-71	-85	-89	-89

Nota. Reducción del porcentaje de emisión de gases contaminantes según norma Euro II a V, a partir de valor para Euro I. Tomado de “Revista Auto, Las normas Euro y su evolución”, vía web.

El resumen de valores dado en este apartado, se hizo con el fin de ilustrar al lector en las normas, leyes o decretos con vigencia, control, regulación y sanción actualmente en Colombia, sin dejar de lado otro tipo de documentos que se encuentran en proceso de recepción y cumplimiento, con importancia internacional. A continuación, se mostrará un árbol de importancia de las normas para el proyecto (Figura 3).

Figura 3.

Árbol normativo pertinente para el proyecto.



Nota. Árbol resumen de la normativa relevante y pertinente para el proyecto.

2. MICROALGAS

Actualmente, la aplicación de microorganismos en diferentes campos de la industria ha venido tomando fuerza, especialmente el uso de microalgas en el área biotecnológica, ya que, gracias a su rápido crecimiento, alta productividad, altas eficiencias y uso de energías limpias como la solar, permiten el desarrollo de procesos sostenibles, aunque con ciertas complicaciones a la hora de ser llevados a escala industrial [55], por lo cual las microalgas son usadas industrialmente en la producción y optimización de procesos o nuevos productos, como también en la reducción o minimización de un producto o residuo industrial, principalmente en procesos de tratamiento de aire o agua con el fin de biofijar los gases obtenidos especialmente CO₂ y generar productos de valor agregado a partir de la biomasa obtenida.

Considerando lo anterior, se realizó una extensa revisión bibliográfica, acerca de los diferentes estudios y proyectos que se han desarrollado sobre el uso de microalgas en la industria, tomando documentos de diferentes categorías desde artículos de investigación hasta tesis de grado de diversas bases de datos como lo fueron Knovel, Science Direct, Celsius entre otras, en donde se encuentran antecedentes de los distintos tipos de industrias que han venido fomentando el uso de este tipo de tecnologías con microorganismos, por ello se inició la investigación entre las diferentes bases de datos encontrado alrededor de 10 000 resultados, arrancando con aproximadamente 70 documentos, y a raíz del modo en que se fue desglosando el proyecto se realizó una revisión exhaustiva de los artículos para llevar a cabo la toma de decisión de criterios relevantes en esta etapa del proceso, con 20 documentos, con los cuales se llega a la selección de las cepas a usar para el cultivo mixto (Anexo 3).

Las microalgas son microorganismos unicelulares, fotoautótrofos (en su mayoría), eucariotas o procariotas, con la capacidad de producir su propio alimento a partir de sustancias o compuestos inorgánicos, con excepción de algunas especies que son capaces de usar como fuente de energía compuestos orgánicos para el proceso de fotosíntesis [56]. Este tipo de microorganismos son más eficientes que las plantas en el proceso de fotosintético, debido a que reducen hasta el 80% de CO₂ durante su crecimiento [57], de la misma manera, son más adecuadas en comparación con otros microorganismos teniendo en cuenta su estructura (unicelular, multicelular o simple) y su fácil adaptación al medio.

2.1 Metabolismo de microalgas

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos principalmente, donde mediante al proceso ya mencionado se usa una fuente inorgánica (CO_2) y energía lumínica (Energía Solar) para dar paso a las reacciones fotoquímicas (ver figura 4) con las cuales se produce biomasa y oxígeno (O_2) [58], este proceso fotosintético consta de dos mecanismos principales:

2.1.1 Mecanismo fotoquímico

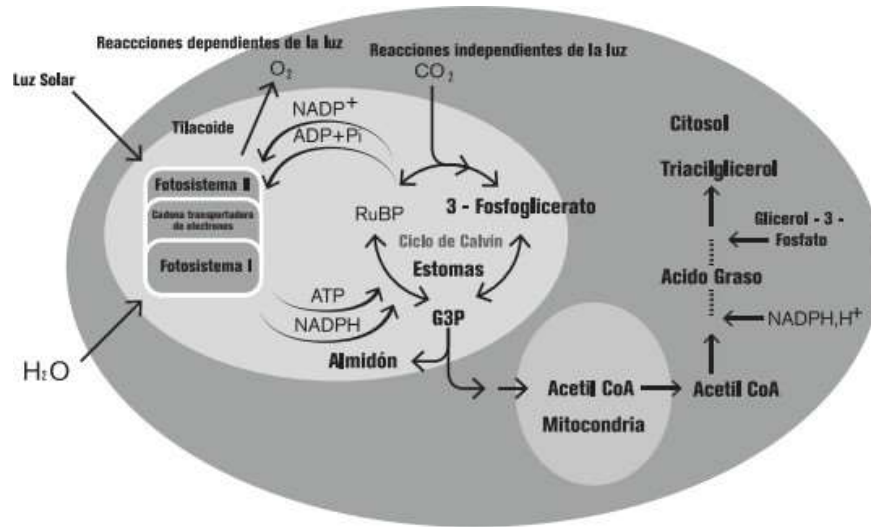
El mecanismo presenta dos procesos bioquímicos, de modo que inicialmente ocurre una reducción de NADP a NADPH, la cual se genera por medio de la energía lumínica (energía solar) que es absorbida por los pigmentos fotosintéticos, con el fin de metabolizar el CO_2 (dióxido de carbono) a CH_2O (metanal), a partir de esta oxidación, el agente oxidante NADP^+ se reduce a NADPH (nicotinamida adenina dinucleótido fosfato) liberando O_2 (oxígeno) y ATP sintetizado, el cual se incorpora al proceso de fosforilación durante el transporte de electrones [56], [59].

2.1.2 Mecanismo de fijación del dióxido de carbono (CO_2)

El mecanismo funciona tomando del mecanismo anterior, el poder reductor del NADPH y la energía producida del ATP para la reacción de fijación del carbono, donde el CO_2 se incorpora a la ribulosa 1,5 difosfato (rubisco) y el producto de esta se divide en tres moléculas de carbono, ácido fosfoglicérido (PGA) y la reducción del PGA causada por el electrón transportador NADPH, metabolizando así los compuestos orgánicos para desencadenar la glucosa [56], [59].

Figura 4.

Ciclo de Calvin-Benson

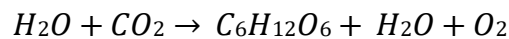
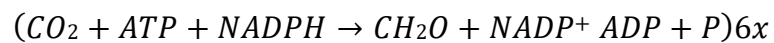
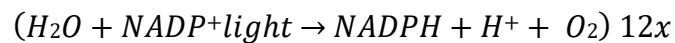


Nota. Representa los mecanismos de reacción, con los cuales funciona el metabolismo de las microalgas. Tomada de: Microalgas para la industria alimenticia (2015). Vía PDF.

La mejor manera de presentar los mecanismos nombrados anteriormente, es conocerlos como el proceso o ciclo de Calvin-Benson, donde se muestra de manera clara el funcionamiento de los mecanismos usados por el metabolismo de las microalgas como se observa en la figura 4 y en las siguientes ecuaciones que marcan la ruta metabólica global de los mismos (ver Ecuación 1) [56].

Ecuación 1.

Ecuaciones de la ruta metabólica de las microalgas



Nota. Representación de la ruta metabólica del proceso de fotosíntesis que desarrollan las microalgas. Tomada de Microalgae with potential in air treatment (2020). Vía PDF.

2.1.3 Tipos de metabolismo

Por otro lado, las microalgas tienen la capacidad de absorber y almacenar grandes cantidades de energía lumínica, debido a que su actividad metabólica es directamente proporcional a esta, generando una tasa de reproducción alta [59], a través de la cual se logra un crecimiento óptimo de los microorganismos teniendo en cuenta el tipo de “metabolismo” que realizan las diferentes especies; por ello, a continuación, se explicaran los más significativos:

2.1.3.a Mixotrófico. Es el proceso en el cual las microalgas utilizan como fuente de carbono tanto compuestos inorgánicos (CO_2), como orgánicos para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, esto quiere decir que ocurren simultáneamente los procesos de heterotrofia y autotrofia [60].

2.1.3.b Fotoheterótrofo. Es el proceso donde las microalgas usan otros organismos como azúcares para tomar los compuestos orgánicos como fuentes de carbono, llevando a cabo el proceso de fotosíntesis [59].

2.1.3.c Heterótrofo. Así como con los fotoheterótrofos, este tipo de microalgas requieren los compuestos orgánicos de otros organismos, para obtener su fuente de energía, pero a diferencia de los anteriores estos no requieren de una fuente de energía lumínica para hacer su fotosíntesis, mientras presenta un crecimiento más rápido y mejores rendimientos [59], [55].

2.1.3.d Fotoautótrofo. En este proceso se requiere principalmente de una fuente inorgánica como alimento de carbono, en donde principalmente se usa el dióxido de carbono (CO_2) y una fuente lumínica, la cual es una variable importante en el crecimiento del microorganismo para este tipo de metabolismo [59].

2.1.3.e Autótrofo. Este proceso requiere una fuente inorgánica (CO_2), energía lumínica y otros nutrientes como fuentes de energía (a diferencia del tipo anterior), para poder llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, presentando así una aplicación más viable para los tratamientos de contaminantes [55].

2.2 Tipos de microalgas

Existen alrededor de 300 000 especies de microalgas, de las cuales solo han sido documentadas 30 000, debido a esto se ha facilitado la investigación acerca de su adaptación, crecimiento y producción en las familias o especies de mayor aplicación industrial y en las que brindan solución

a diversas problemáticas ambientales, principalmente la captura o biofijación de gases generados por la combustión de fuentes fijas o móviles [41], [55].

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que solo una pequeña variedad de estos microorganismos es conocida, estudiada y aplicada actualmente, siendo las especies de microalgas más utilizadas las Cianofíceas (algas verde-azuladas), las Clorofíceas (algas verdes), las Bacillariofíceas (incluidas las diatomeas) y las Crisofíceas (incluidas las algas doradas), entre otras, como se evidencia en la Figura 5 “Cuadro Familias de microalgas”. En el Anexo 1 es posible ver la ampliación realizada a la tabla [41], mediante la cual se presenta una recopilación de las familias más usadas para diferentes aplicaciones industriales como la farmacéutica, cosmética, entre otras; las más viables para los tratamientos de agua o aire según estudios, los mejores resultados obtenidos de diversas fuentes bibliográficas en cuanto a la producción de biomasa, biofijación de CO₂, y finalmente, las ventajas y desventajas que desarrolla cada especie para poder llevar a cabo el proceso metodológico adecuado y así escoger las mejores familias posibles a usar dentro del proceso a proponer.

Figura 5.

Cuadro Familias de microalgas

Familia	Aplicación Industrial	Ventajas	Desventajas
<i>Chlorella</i>	Suplementos Proteínas, Productos Cuidado personal, Cosmética	Potencial para secuestro de CO ₂ y producción de biocombustibles. Alta tolerancia al N y P	Se inhibe con corrientes enriquecidas en CO ₂ mayores a 20 %v/v y temperaturas mayores a 30°C
<i>Chlorococcum</i>	Suplementos Proteínas, Productos Cuidado personal	Tiene tolerancia a altas concentraciones de CO ₂	Tiene baja tolerancia al agua residual

<i>Botryococcus</i>	Producción de biocombustibles	de	Potencial para secuestro de CO ₂ y producción de biocombustibles por su alto contenido en lípidos	A grandes concentraciones de CO ₂ su tasa de rendimiento.
<i>Dunaliella</i>	Producción de beta-carotenos, Farmacéutica Alimentos	y	Estas especies pueden vivir en un amplio rango de concentración de productos químicos y de composición salina	Requiere de un porcentaje mínimo de salinidad en el agua
<i>Nannochloropsis</i>	Alimento animales, fertilizantes insecticidas	de e	Potencial para secuestro de CO ₂ y producción de biocombustibles	Se inhibe con corrientes ricas en CO ₂ y presenta baja producción de biomasa en presencia de N ₂
<i>Scenedesmus</i>	Cosméticos, fertilizantes insecticidas	e	Potencial para secuestro de CO ₂ y producción de biocombustibles; alta tasa de crecimiento a bajas concentraciones de CO ₂	Requieren de tiempos de fase oscura muy cortos (> 4hrs)
<i>Spirulina</i>	Suplementos Proteínas, fertilizantes insecticidas	e	Alto rendimiento en biomasa, tiene rendimientos altos independientemente de la concentración de CO ₂	Requiere de concentraciones mínimas N ₂ para la captura de CO ₂

Chlamydomonas	Farmacéutica, Biocombustibles	Alta producción de biomasa biocombustibles por su contenido en lípidos	No tolera altas concentraciones de CO ₂ corrientes ricas en CO ₂
---------------	----------------------------------	--	--

Nota. Muestra de los diferentes tipos de familias recopiladas por la literatura con sus respectivas ventajas y desventajas; cuadro completo en el anexo 1, donde se encuentran las diferentes especies y tasas de fijación y producción de las mismas.

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se da paso a la descripción de las principales familias usadas para la depuración y biofijación de gases, considerando que la concentración mínima de CO₂ producida hacia la atmósfera en el año oscila entre 0.036 a 0.045 % v/v [61]:

2.2.1 *Chlorella sp*

Son microalgas verdes fotoautótrofas de forma esférica (2 a 10 µm de diámetro), sin flagelos, que contienen pigmentos fotosintéticos verdes (clorofila a y b) en sus cloroplastos. Esta especie se reproduce rápidamente y solo usa dióxido de carbono, agua, luz y una pequeña cantidad de minerales [41].

Inicialmente son cultivadas en pequeños frascos de cultivo, los cuales se utilizan posteriormente como inóculos para tanques, fotobiorreactores y estanques de mayor capacidad, como los estanques abiertos mixtos con paletas. La composición bioquímica de la *Chlorella* muestra que contiene entre un 11 y un 58% de proteínas, entre un 12 y un 28% de carbohidratos y entre un 2 y un 46% de lípidos de su peso seco, a su vez la *Chlorella* contiene varias vitaminas como Provitamina A (55.500IU/kg), β-caroteno (180 mg 100/g), Vitamina E (<1mg 100/g), Tiamina B1 (1,5 mg 100/g), Riboflavina B2 (4,8 mg 100/g), Niacina B3 (23. 8 mg 100/g), Vitamina B6 (1,7 mg 100/g), Inositol (165,0 mg 100/g, Vitamina B12 (125,9 mg 100/g), Biotina (191,6 mg 100/g), Ácido Fólico (26,9 mg 100/g), y Ácido Pantoténico (1,3 mg 100/g) [41].

La producción industrial se lleva a cabo a gran escala en Japón y Taiwan, por medio de cultivos fototrópicos, en sistemas abiertos o de fermentación, obteniendo una producción anual de 5 000 Ton de biomasa seca al año [55].

2.2.2 *Spirulina sp*

También conocida “*Arthrospira*”, son microalgas simbióticas, multicelulares, autótrofas y filamentosas de color verde azulado, donde su principal pigmento fotosintético es la ficocianina que le da el color azul, aunque algunas contienen ficoitrina que le brinda un color entre rojo y rosado, estas especies pueden tener forma de espiral o de disco y a su vez también contienen clorofila a y carotenoides. Su tipo de reproducción es la fisión binaria, crece mejor en pH altos (9 – 11), su temperatura óptima es entre 35°C a 37°C y se ve favorecida a las altas concentraciones de bicarbonato, haciendo su forma de cultivo fototrópica principalmente en equipos de estanques abiertos con ruedas o paletas de remo [41], [55].

La *spirulina* es rica en la producción de proteínas, vitaminas, aminoácidos esenciales, minerales y ácidos grasos poliinsaturados y pigmentos como la ficocianina, la mixofila y la zeaxantina. La *spirulina* contiene entre un 46 y un 71% de proteínas, entre un 8 y un 16% de carbohidratos y entre un 4 y un 9% de lípidos de su peso seco. Los aminoácidos esenciales de la *spirulina* son la leucina, la isoleucina y la valina y también contiene una concentración relativamente alta de provitamina A, vitamina B12, vitamina K y β -caroteno [41].

Es producida en todo el mundo siendo su mayor fabricante China, el cual produce 1 000 Ton al año y 10 000 Ton biomasa al año, llegando a precios de 20 €/kg en producción y entre 1 y 5 €/kg en coste de producción de biomasa [55].

2.2.3 *Scenedesmus sp*

Son microalgas verdes, de fácil mantenimiento en el laboratorio debido a su rápido crecimiento y facilidad nutricional, esta especie se divide en dos tipos según su morfología oblicuas y con espinas, donde ambas se encuentran en colonias y se reproducen de forma asexual, aunque algunas pueden llegar a reproducirse sexualmente por fusión de isogametos biflagelados [62], [63]. Sus parámetros óptimos se encuentran en una temperatura de entre 25-30°C y pH neutros, es decir entre 7-8.

En la *scenedesmus* están presentes los ácidos grasos en un 44%, de los cuales se encuentran el ácido palmítico en un 30%, ácido oleico en un 58%, ácido linoleico en un 12%, a su vez se encuentran un contenido en lípidos entre un 11 a un 50% en peso seco, donde la mayoría son

triacilglicéridos y un contenido de carbohidratos de un 24% dependiendo el tipo de especie [64], [65].

2.3 Método de selección y sus criterios

Inicialmente, se realiza un flujograma de toma de decisiones, el cual se encuentra en el “Anexo 3”, donde se observa como pregunta principal que tipo de cepas son adecuadas para el desarrollo del sistema mixto de microalgas, luego se da paso a la recopilación de información que brinda los argumentos bibliográficos necesarios para seleccionar los criterios específicos, teniendo en cuenta el contenido de cada documento, la profundización de cada criterio y la importancia dada dentro del mismo, con el fin de soportar cada uno de estos (Anexo 1).

Para alcanzar este objetivo es necesario hacer uso de métodos y técnicas que contribuyan con una toma de decisiones adecuadas, en este caso se hará uso de la metodología AHP por sus siglas en inglés (Analytic Hierarchy Process), modalidad que consiste en un proceso analítico jerárquico, basándose en la toma de decisiones de difícil valoración, ya sea por similitud en sus características o de difícil puntuación; al usar un método multiatributo (criterio o variable), que permita tomar decisiones claras de la jerarquización de criterios a tener en cuenta sin caer en sesgo [7].

Las cepas a tener en cuenta en la matriz, son las descritas con mayor profundidad en el ítem 2.2 Tipos de microalgas, el primer paso previo a realizar para la metodología AHP, consistió en desarrollar una tabla de características, ventajas, desventajas de cada familia, especie estudiada y relevante para el proyecto, con el objetivo de realizar una reducción en las opciones de la cepa a usar [41] (ver Anexo 1); Al obtener una menor cantidad de cepas a elegir se prosiguió con el primer paso del método, el cual consiste en determinar los criterios fundamentales para la elección de cepas, en este caso porcentaje de fijación de carbono, velocidad del alimento, producción de biomasa (medida anual), composición de nutrientes y sustancias tóxicas, intensidad lumínica, pH y fotoperiodo [66]. A continuación, se hará una pequeña descripción de cada criterio elegido, finalizando con la primera matriz del método (criterio vs criterio).

2.3.1 Criterios

En el proceso de selección de cepas óptimas a implementar en el sistema de depuración, se tomaron criterios muy bien definidos, relevantes y mutuamente excluyentes [7], de acuerdo a literatura

consultada, teniendo en cuenta parámetros ya establecidos por el método, como número de criterios inferiores o iguales a 7 y no pares.

2.3.2.a Porcentaje de biofijación de carbono. El criterio hace referencia a la cantidad de CO₂ absorbido y transformado en biomasa durante el Ciclo de Calvin-Benson, mediante un proceso de fijación a través de microorganismos [56], en este caso microalgas. Es un criterio relevante, dado que permite conocer la productividad del microorganismo, por medio de la tasa de conversión de contaminantes en sustancias aprovechables [67], de forma tal que corresponde a la segunda etapa del proceso fotosintético de las microalgas, en el cual se metabolizan las moléculas de carbono a compuestos orgánicos [56].

2.3.2.b Velocidad del alimento. El criterio de velocidad del alimento es de vital importancia para determinar la característica importante del sistema, como dimensiones del reactor, el tipo de adaptación que se debe efectuar en el cultivo propuesto, corriente de nutrientes y la velocidad de crecimiento de los microorganismos [56], [68]; dado que al conocer el valor de este criterio se facilita la posibilidad de calcular la densidad celular del cultivo [68] y sus respectivos balances de masa y energía.

2.3.2.c Producción de biomasa anual. La biomasa se considera como la materia orgánica generada en un proceso biológico, que en el caso de las microalgas se encuentra compuesto generalmente por proteínas, carbohidratos y lípidos [69]; los cuales permiten determinar la conversión obtenida de los contaminantes iniciales en sustancias de valor agregado o residuos de menor impacto para el ambiente, de igual forma, también permite determinar características propias del proceso y la eficiencia de la o las cepas a utilizar, proporcionando información no solo del producto obtenido sino de las etapas del proceso [60].

2.3.2.d Composición de nutrientes y compuestos tóxicos. Este criterio permite conocer los perfiles cuantitativos y cualitativos de los nutrientes que requiere un cultivo mixto para su funcionamiento, del mismo modo, permite conocer los perfiles de los tipos de sustancias o compuestos presentes en los gases de combustión que son tóxicos o nocivos para el medio de cultivo y su crecimiento celular [70], y así poder determinar la concentración necesaria, mínima o máxima requerida para llegar a una tasa de crecimiento óptima y la relación correcta entre los mismos [71].

2.3.2.e Fotoperiodo y fotoinhibición. Estos criterios se tomaron como uno solo, al ser incluyentes entre sí, ya que el fotoperiodo o ciclo de luz y oscuridad afecta de manera directa el crecimiento y

reproducción de los microorganismos, así como la producción de biomasa a través del Ciclo de Calvin [60], mientras que la fotoinhibición hace referencia a los efectos nocivos que se pueden desarrollar en el cultivo, debido al estrés generado por la luz o por los tiempos inadecuados de esta [69]. Por estos motivos es de vital importancia tener control de este criterio a lo largo del proceso, controlando de manera óptima los tiempos de conversión con la intensidad de luz adecuada en el cultivo [72].

2.3.2.f Intensidad lumínica. Este criterio es fundamental para el análisis de cepas a utilizar, ya que al ser microorganismos que emplean la fracción del espectro de luz solar, que es fotosintéticamente visible (entre 350 y 700 nm) [60], afectan la síntesis de la clorofila y el crecimiento de los microorganismos; además el desbalance de la intensidad lumínica en el cultivo repercute en la optimización del equilibrio de las actividades metabólicas del mismo (en especial de cultivos mixtos) [60], llegando a causar una baja velocidad en el crecimiento a bajas cantidades de luz, así como causar daños foto-oxidativos nocivos (en especial en reactores cerrados) a altas cantidades de esta [60].

2.3.2.g pH. Este criterio es un parámetro importante en la selección y desarrollo de un cultivo mixto, dado que permite conocer que tanta tolerancia tiene cada cepa al CO₂ y su disponibilidad en el sistema, logrando tener un adecuado seguimiento de este parámetro dentro del sistema y así evitar la inhibición del crecimiento celular [73]; paralelamente contribuye en gran medida en el metabolismo de cada microorganismo [73], [74] y la solubilidad de los diferentes compuestos dentro del mismo.

2.3.2 Comparación (criterio vs criterio)

Al determinar los criterios de mayor relevancia para la selección de cepas a utilizar en el proyecto (respecto a bibliografía), se realiza el segundo paso del método AHP, el cual consiste en comparar mediante una matriz cuadrada los criterios vs criterios, ponderando valores de acuerdo a la escala Saaty (ver anexo 4) [66]. Posterior a esto, se realizó una matriz normalizada, donde se relaciona el valor propuesto con la suma total de cada criterio, con el fin de obtener los porcentajes de relevancia entre los criterios evaluados [7], determinando los 4 criterios de mayor ponderación a ser usados para elegir las cepas del cultivo de microalgas a utilizar.

Tabla 4.*Matriz N°1 Criterios vs Criterios*

Criterios	Porcentaje de fijación de carbono	Velocidad del alimento	Producción de biomasa	Composición de nutrientes y compuestos tóxicos	Intensidad lumínica	pH	Fotoperiodo y fotoinhibición	Porcentaje ponderado del criterio
Porcentaje de biofijación de carbono	1	5	1	7	5	7	3	30%
Velocidad del alimento	1/5	1	1/7	5	1/9	1/5	1/3	5%
Producción de biomasa	1	7	1	3	1	3	1	18%
Composición de nutrientes y compuestos tóxicos	1/7	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/3	3%
Intensidad lumínica	1/5	9	1	7	1	7	3	23%
pH	1/7	5	1/3	5	1/7	1	1	9%
Fotoperiodo y fotoinhibición	1/3	3	1	3	1/3	1	1	10%
TOTAL	3,02	30,20	4,81	31	7,73	19,	9,67	

4

Nota. Matriz de criterios vs criterios, en donde se establecen los valores de importancia de cada criterio de acuerdo a los valores dados por la escala Saaty, además de establecer los porcentajes de importancia para evaluar las cepas del cultivo mixto.

En la Tabla 4 se observa la tabla criterios vs criterios y la ponderación obtenida mediante la normalización de la matriz, dando como resultados un 32% para el criterio Porcentaje de biofijación de carbono, 23% Intensidad lumínica, 18% Producción de biomasa, 10% Fotoperiodo y fotoinhibición, 9% pH, 5% velocidad del alimento y finalmente 3% Composición de nutrientes

y compuestos tóxicos; dando la posibilidad de determinar, que los criterios a tener en cuenta serán los tres mencionados inicialmente, al ser ellos los que alcanzaron valores superiores al 10%, evidenciando su importancia a la hora de toma de decisiones y satisfaciendo las necesidades que requiere el proyecto con respecto a los microorganismos.

El criterio de porcentaje de biofijación de carbono al ser el de mayor ponderación, indica que la evaluación de la depuración del cultivo mixto se verá afectada y enmarcada directamente por el mismo, al permitir el análisis de conversión de emisiones de gases de fuentes móviles en productos aprovechables como biomasa [12], [56], además de evaluar la productividad de las familias y/o cepas.

En el caso de la intensidad lumínica se debe considerar tanto su impacto económico en el diseño del sistema, así como los tiempos de exposición de los microorganismos a esta, sin causar fotoinhibición o reducción en la tasa de crecimiento [60]; permitiendo abarcar criterios relacionados, como el caso del fotoperiodo y la fotoinhibición.

Para finalizar, se tomó la producción de biomasa (anual), al ser el tercer criterio de mayor ponderación con un 18% de acuerdo a la matriz normalizada de criterios vs criterios, nos permite caracterizar, medir y evaluar junto con la fijación de carbono el desempeño y tasa de conversión de compuestos tóxicos iniciales en productos de valor agregado, gracias al tratamiento del cultivo de microorganismos a usar [60], [69].

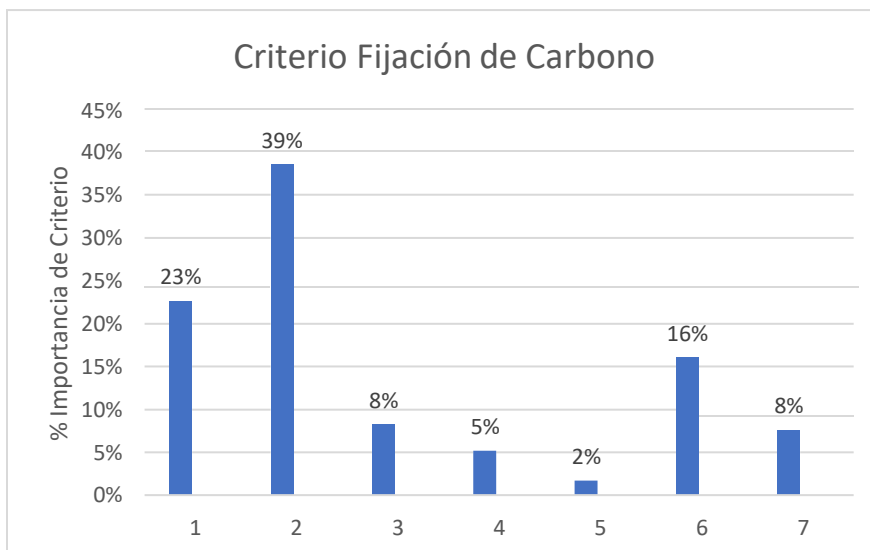
Siguiendo con la metodología, al determinar los criterios de mayor influencia a tener en cuenta para la elección de cepas, se procede a realizar las matrices de comparación de alternativas (familias) con respecto a cada criterio elegido, designando una secuencia numérica a cada opción, de la siguiente manera 1 *Chlorella*, 2 *Chlorococcum*, 3 *Scenodermus*, 4 *Spirulina*, 5 *Chlamydomonas*, 6 *Dunaliella*, 7 *Botrycoccum*. Teniendo en cuenta que la familia *Nannochloropsis* no fue considerada al inhibirse con corrientes ricas en CO₂ y presentar baja producción de biomasa en presencia de N₂ [41].

2.3.3.a Criterio de porcentaje de fijación de carbono. La primera matriz a evaluar es el porcentaje de biofijación de carbono (ver Anexo5), comparando las siete alternativas de familias consideradas con los valores de importancia asignados previamente de acuerdo con la escala Saaty [66]; la matriz solución de este criterio se encuentra en el Anexo 5, sin embargo, el resultado se presenta a

continuación en la Figura 6 (Resultado matriz porcentaje de fijación de carbono), donde se observa que la mejor familia con respecto a este criterio es la *Chlorococcum* con un 39% y la menos adecuada es la *Chlamydomonas* con un 2%. Contemplando también para el cultivo mixto las familias con porcentajes altos, es decir superiores al 10% como lo son la *Chlorella* y *Dunaliella*.

Figura 6.

Resultado matriz fijación de carbono



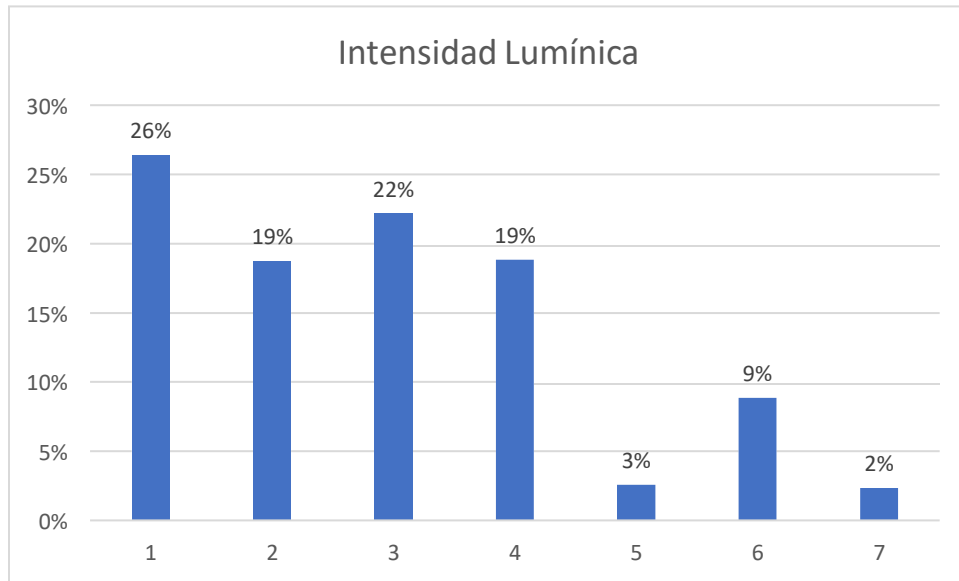
Nota. Gráfico resumen de la importancia de cada opción de familia con respecto al criterio de fijación de carbono.

2.3.3.b Criterio de intensidad lumínica. La segunda matriz por evaluar es la intensidad lumínica, de modo que se compararon las siete alternativas ya descritas con los valores ya asignados en la matriz para así determinar las cepas a usar; teniendo presente que el criterio es cuantificado con las condiciones críticas a las que fueron sometidas las familias y no a condiciones estándar, debido a las variaciones que este criterio puede presentar en las especies de acuerdo al sistema en que sean usadas [56].

La matriz solución se presenta en el Anexo 6 y los resultados en la Figura 7, en donde se evidencia que la familia con mejor capacidad de intensidad lumínica es la *Chlorella* con un 26% y la de menor capacidad es la *Botryococcum* con un 2%, pero debido a que es un cultivo mixto, es decir, que se considera así con un mínimo 4 cepas [41], se tuvieron en cuenta también las familias *Scenedesmus* con un 22%, *Chlorococcum* y *Spirulina* con un 19%.

Figura 7.

Resultado matriz intensidad lumínica

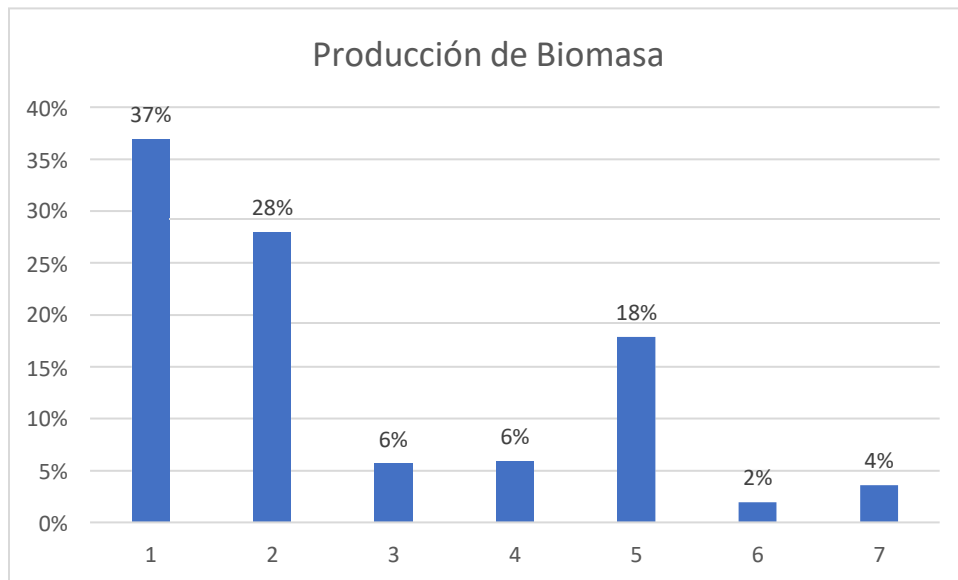


Nota. Gráfico resumen de la importancia de cada opción de familia con respecto al criterio de la intensidad lumínica.

2.3.3. c Criterio producción de biomasa (anual). La tercera y última matriz a evaluar se realiza con respecto a la producción de biomasa anual, en esta se comparan las siete alternativas, en función de los valores consultados y plasmados en el Anexo 1; La matriz solución se presenta en el Anexo 7 y los resultados de esta en la figura 8, de los cuales se concluye que la mejor familia con respecto al criterio es la *Chorella* con un 37%, seguida de la *Chlorococcum* con un 28%, la *Chlamydomona* con un 18% y las familias *Scenedesmus* y *Spirulina* con un 6%, siendo la menos favorable la *Dunaliella* con un 2% al presentar un baja producción de biomasa con respecto a las demás, cabe aclarar que se tomaron 5 familias debido al empate presentado entre la *Scenedesmus* y la *Spirulina*.

Figura 8.

Resultado matriz producción de biomasa



Nota. Gráfico resumen de la importancia de cada opción de familia con respecto al criterio de la producción de biomasa anual.

2.3.3 Matriz final de selección de familias a partir de los criterios tomados

Para finalizar, se realiza una última matriz, con el objeto de identificar las familias más viables de microalgas a usar en el cultivo mixto, examinando los resultados obtenidos del análisis de los tres criterios versus las siete familias; para llevar a cabo esto, se hace uso de la función suma producto de Excel, la cual multiplica el valor de cada casilla en la fila de las opciones por los valores hallados en la Tabla 4 (criterios vs criterios), procediendo a efectuar la suma de estos valores y así determinar la o las opciones más viables.

Tabla 5.*Matriz selección de familias a usar en el sistema*

Criterios	Porcentaje de fijación de carbono	Intensidad Lumínica	Producción de biomasa	Porcentaje del criterio
<i>Chlorella</i>	23%	26%	37%	19%
<i>Chlorococcum</i>	39%	19%	28%	21%
<i>Scenedesmus</i>	8%	22%	6%	9%
<i>Spirulina</i>	5%	19%	6%	7%
<i>Chlamydomonas</i>	2%	3%	18%	4%
<i>Dunaliella</i>	16%	9%	2%	7%
<i>Botryococcum</i>	8%	2%	4%	3%
	30%	23%	18%	

Nota. Tabla final de selección de familias a usar en el cultivo mixto y sistema, a partir de la normalización y suma producto de las columnas obtenidas en las matrices anteriores.

Se concluyó a partir de la matriz final de decisión que las mejores familias para la depuración de gases de combustión de fuentes móviles, de acuerdo con los criterios establecidos, son la *Chlorococcum* con un 21%, *Chlorella* con un 19%, *Scenedesmus* con un 9% y la *Spirulina* y *Dunaliella* con un 7%; estas especies serán el grupo de cepas a usar en el biorreactor luego de obtener un cultivo mixto activo, esperando una depuración significativa de los contaminantes a tratar.

2.4 Medio de cultivo mixto y sus parámetros

Es una estrategia con la cual se lleva a cabo un seguimiento constante del crecimiento, tasa de biofijación y producción de una o varias cepas de microalgas, dando paso a la generación de un cultivo de diferentes especies de microorganismos con un fin común; generalmente estos co-cultivos o cultivos mixtos dan lugar a un cultivo denso con mayor producción de biomasa algal, donde se desarrolla un medio que brinda la relación óptima entre los parámetros y su influencia en el crecimiento de las cepas a usar [75], [76]; por ello, para desarrollar un cultivo mixto dinámico, la elección de las cepas debe hacerse rigurosamente y teniendo presente que los consorcios de

microorganismos generados a gran escala son complejos y limitados [76], manejando parámetros que logren una tasa de crecimiento óptima y una solución viable del sistema, como:

2.4.1 Temperatura

Este parámetro es uno de los más importantes, ya que la productividad del cultivo y la tasa de crecimiento depende de este, puesto que así varíe dependiendo la especie, las microalgas se mantienen en un rango de temperatura óptima entre 15 y 40°C, donde con temperaturas superiores e inferiores se puede llegar a inhibir el crecimiento y metabolismo de carbono y nitrógeno [56], [73]; Cabe destacar que al ser un cultivo mixto se busca un desempeño adecuado de las especies teniendo en cuenta que las altas temperaturas reducen la producción de biomasa y las bajas el crecimiento, por lo tanto un rango de temperatura óptima para este medio se daría entre los 20 y 30°C [70], [77].

2.4.2 pH

El parámetro de pH es afectado por otras variables como la actividad microbiana, la inyección de CO₂ y la eficiencia de la misma, la alcalinidad y la composición iónica del medio; teniendo en cuenta lo anterior, las microalgas se mantienen en un rango óptimo de entre 7 y 9, aunque la mayoría de cepas presenten un comportamiento óptimo alrededor de los 7.5 y 8 [56], [76]. De manera similar, los cultivos mixtos generan dependencia a este parámetro puesto que determina la solubilidad y disponibilidad de los nutrientes necesarios para el cultivo y dilución de diferentes compuestos, por lo cual mantener un pH neutro (7 ± 0.5) evita la inhibición metabólica dentro del cultivo [73].

2.4.3 Intensidad lumínica

La ruta metabólica de la mayoría de microorganismos depende de la intensidad lumínica y de su composición espectral para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, esto hace que este parámetro sea uno de los de mayor relevancia, ya que las diversas especies de microalgas poseen altas concentraciones de diferentes pigmentos llegando a necesitar rangos de intensidad lumínica de entre 1 500 a 8 500 W*h/m²*día [56], [73]; en consecuencia, el aumento de la intensidad provoca fotoinhibición y la inactivación de las enzimas que fijan el CO₂, por ello manejar un rango óptimo es de principal interés para un correcto funcionamiento del cultivo, es decir, llegar a establecer un

rango para el mismo en donde se relacione el parámetro descrito con la temperatura, teniendo en cuenta que estas son directamente proporcionales en función de la fotosíntesis [73], [74].

2.4.4 Nutrientes

Todo medio de cultivo requiere de nutrientes esenciales para el correcto funcionamiento del sistema, debido a que la tasa de crecimiento es proporcional a la absorción de nutrientes en condiciones óptimas de los demás parámetros, por otro lado, la limitación o exceso de los mismos puede generar cambios en la ruta metabólica de las microalgas y por lo tanto afectaciones en el crecimiento, producción de biomasa, biofijación de CO₂ y composición bioquímica [73].

Los nutrientes se representan en dos grandes grupos, macronutrientes como lo son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo [56]; en donde el nitrógeno ayuda a la formación de proteínas aunque al presentarse en diversas formas como NO, NO₂⁻ y NO₃⁻ puede llegar a formar ácido nítrico (HNO₃), cuya presencia disminuiría el pH generando un medio ácido que reduciría la tasa de crecimiento, el fósforo beneficia la formación de fosfolípidos que son aportados a la producción de ATP, mientras no sea expuestos a medios alcalinos o ácidos puesto que el sistema metabólico al encontrarse en dichas condiciones procederá a la eliminación de los mismos ya que se formara fosfato de calcio (Ca₃(PO₄)₂). De manera similar, los demás elementos requeridos (principalmente el carbono), son necesarios para el proceso de fotosíntesis, la formación de células y la respiración celular [73], [62].

Por otro lado, están los micronutrientes (los cuales varían dependiendo el tipo de cepa a usar) principalmente son el hierro, manganeso, cobalto y zinc siendo estos importantes a la hora del crecimiento, la fotosíntesis y respiración algal como catalizadores en ciertas partes del sistema [73], [56], sin embargo, al implementar un cultivo mixto que contiene varias especies se prioriza el flujo de los macronutrientes y se reduce el de micronutrientes para que no se genere una inhibición del crecimiento entre las mismas.

2.4.5 Salinidad

Aunque la mayoría de especies son altamente tolerantes a los cambios de salinidad, el parámetro es relevante dentro del cultivo ya que representa la concentración de cloruro de sodio (NaCl) presente en el sistema, que puede llegar a afectar o potenciar el crecimiento y la composición bioquímica de las especies; de igual forma, al ser un sistema donde se hace uso de cultivo mixto

exponerlo a altos índices de salinidad puede inhibir el crecimiento, por lo cual una salinidad entre 20 – 24 g/L supondría el rango óptimo para las especies cultivadas y así establecer las condiciones adecuadas para una mayor biofijación de CO₂ y producción de biomasa [73], [74], [78].

2.4.6 Fotoperiodo

El termino fotoperiodo es tomado considerando las condiciones normales a las que están expuestas las microalgas, es decir, periodos de luz y oscuridad, dado que en el periodo de luz se da la mayor absorción de nutrientes y en el periodo oscuro se mide la absorción de energía, este tipo de ciclos luz – oscuridad son los más complejos a implementar en un sistema, debido a que en condiciones normales ellas requieren un mínimo de 8 horas de oscuridad y 16 de luz [71], [74], en tanto que en condiciones extremas se pueden llevar a un máximo de 24 horas de luz provocando una reducción en el rendimiento del mismo, por ende según diversos estudios se ha venido demostrando que para procesos con cultivos mixtos se manejan ciclos de 12 – 14 horas luz o de 10 – 12 de oscuridad [79], [78].

2.4.7 Densidad celular

El parámetro nombrado indica la cantidad celular presente en un cultivo, permitiendo determinar la tasa de producción de biomasa bajo condiciones adecuadas, por ello es importante lograr un flujo idóneo de nutrientes y una inoculación apropiada para llevar a cabo una densidad optima, puesto que una alta densidad genera una disminución en la tasa de crecimiento debido a que se desarrolla un ensombrecimiento entre las mismas, mientras que una densidad baja genera fotoinhibición debido al exceso de luz al que se exponen los microorganismos[74], [73].

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de tecnologías se ha vuelto indispensable para el medio ambiente, debido a las circunstancias por las que está atravesando el mundo y el cambio negativo que es más evidente día a día. Por esto, el uso de tratamientos amigables con el medio ambiente ha venido adquiriendo gran protagonismo, como el caso de las microalgas, las cuales como se ha dicho en capítulos anteriores permiten la depuración, eliminación y/o reducción de contaminantes nocivos tanto para la atmósfera, como para la fauna y flora del planeta.

En este capítulo se determinará por medio de una matriz de decisión la ruta tecnológica más adecuada para la aplicación del proyecto, teniendo en cuenta factores ambientales y tecnológicos relevantes, según criterios de decisión tomados por medio de una revisión bibliométrica, de la cual se obtuvieron cerca de 1 650 resultados, obtenidos de plataformas como Knovel, Celsius, Google académico y Lumieres; tomando de estos cerca de 150, al presentar material relevante respecto al proyecto, ya para finalizar y delimitar la cantidad de artículos, tesis, revistas y demás documentos pertinentes para la investigación, se seleccionan 76 de estos documentos. Determinando a partir de estos, los métodos, técnicas y tecnologías de las subdivisiones del proyecto, como lo son, la caracterización de gases de combustión generados por un motor diésel, los acoples y equipos requeridos tanto a la salida del exhosto como a la entrada del biorreactor, el equipo o sistema de enfriamiento de gases y, por último, las técnicas de determinación de depuración y disposición del producto obtenido. Cabe destacar que los investigadores decidieron dividir el proceso y este capítulo en 3 etapas principales, Upstream, Midstream y Downstream.

3.1 Ubicación

El primer paso a realizar previo a las etapas fundamentales del proceso es determinar la ubicación donde será instalado el sistema, tomando como opciones, el auto (forma “móvil”) o de manera estática en las estaciones de mayor contaminación [80]; con ayuda de un flujograma de toma de decisiones (Anexo 8), seguido de una búsqueda y recopilación de información acerca de la localización de sistemas similares y cómo implementarlos a partir de criterios relevantes a tener en cuenta a la hora de escoger la ubicación, desarrollando una tabla de ventajas y desventajas, la cual permite establecer la mejor ubicación del sistema propuesto.

Figura 9.

Cuadro Ventajas y Desventajas de la ubicación del sistema

Sistema Estático en Estaciones

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Menor cantidad de equipos auxiliares a utilizar en el sistema, como intercambiadores de calor, tanque de almacenamiento y válvulas de control de flujo [14], [15].• Reducción de contaminantes (del sistema y de particulares) en estaciones de alto flujo de buses [80].• Menor cantidad de sistemas de depuración a implementar, ya que no se dispondrán en la totalidad de la flota sino en algunas de las estaciones [80].	<ul style="list-style-type: none">• Variabilidad en el flujo de alimento en la entrada del biorreactor (afectando la tasa de crecimiento del microorganismo) [14].• Requiere de un sistema de seguridad al encontrarse expuesto a la población.• Inactividad en horas de no prestación del servicio (como llevada a patios), así como baja en horas valle [80].• Estructura robusta, al requerir mayor cantidad de microorganismos para la depuración [15].

Sistema Instalado en el Auto

Ventajas	Desventajas
-----------------	--------------------

-
- Control de un flujo de entrada constante.
 - Aprovechamiento de las 19 horas de trabajo del bus (hasta horas de no servicio al público como llevada a patios).
 - Mayor cantidad de contaminantes depurados, al encontrarse en contacto directo.
 - Estructura menos robusta (a pesar del aumento de contaminante).
 - Uso de mayor cantidad de equipos auxiliares para el sistema de depuración, como intercambiadores de calor, válvulas de control y tanques de almacenamiento.
 - Alza en costos, al implementar mayor cantidad de sistema en la flota (se debe implementar un sistema en cada bus Euro IV o inferiores) [47], [81].
 - Aumento de carga para el vehículo.

Nota. Tabla de ventajas y desventajas del lugar de ubicación del sistema de depuración, tomando como opción un sistema “estático” ubicado en una estación de alta nivel de contaminación y un diseño “móvil” al ubicarse sobre el auto.

Luego de realizar la tabla de ventajas y desventajas, se determinó que el sistema de depuración será ubicado en el auto, al presentar ventajas significativas (para el proyecto) sobre la instalación de un sistema estático; además de establecer ventajas a largo plazo tanto para la empresa Transmilenio, como para la comunidad, sentando un precedente para las flotas venideras de la línea biarticulada y metro.

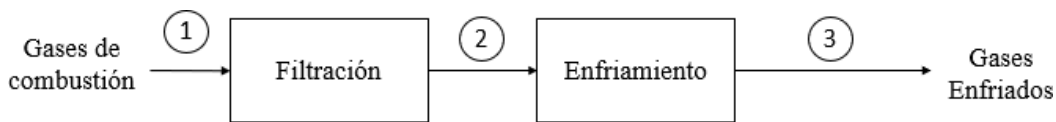
3.2 Upstream

El Upstream o procesamiento de corrientes arriba, es la etapa previa al proceso principal (en este caso el fotobiorreactor), por lo tanto, para el proyecto se tomará como Upstream los procesos de preparación del inoculo y de la corriente gaseosa, como filtración de partículas, enfriamiento de la corriente y control de flujo [82], [68]. Cabe aclarar que en el presente ítem no se profundizara en la preparación del inoculo, ya que en el capítulo anterior (Capitulo 2 MICROALGAS), se trató lo concerniente a esto. A continuación, se muestra el diagrama de bloques de esta etapa, identificando las operaciones unitarias correspondientes, como la filtración de material particulado de la corriente 1 (denominada gases de combustión) y el enfriamiento de la misma corriente (con carga

baja de material particulado), para ser llevada al Midstream, mediante la corriente 3 denominada Gases enfriados.

Figura 10.

Diagrama de bloques del Upstream



Nota. Se representa las corrientes del Upstream (corrientes arriba), determinando las operaciones iniciales del sistema.

Por último, para esta etapa del proceso, se debe desarrollar un balance de energía, que proporcione los requerimientos energéticos del intercambiador de calor y permita la obtención de gases de combustión enfriados, en el presente documento no se hará el desarrollo matemático, al requerir datos experimentales de las corrientes y una extensa revisión, que llevaría a un documento adicional.

3.2.1 Sistema de filtración de partículas

A inicios del siglo XXI se desarrollaron filtros de partículas, para contaminantes diésel, que se han venido implementando por medio de un sistema de recirculación de los gases de escape en la mayoría de los vehículos con este tipo de motores, con el fin de reducir, disminuir o eliminar la cantidad de material particulado que es generado y desechado a la atmósfera por el funcionamiento de estos; en el caso de Transmilenio, se está implementando este sistema en todos sus buses, para reducir en un 97% las emisiones producidas por sus vehículos y con esto cumplir la normativa ambiental impuesta hacia el año 2015 [83], [84], es decir que en la actualidad toda su flota debe tener este sistema implementado.

Este sistema activo de filtros es un proceso compuesto por varias fases, en donde la fase principal es la regeneración, en la cual se queman las partículas de hollín que son generadas en la combustión, esta ocurre al retener a lo largo de las paredes del canal las partículas, mientras el aditivo con base de cerina (catalizador), es empleado para ayudar a disminuir la temperatura y

aumentar la velocidad de combustión en el hollín retenido, y así llevar a cabo la quema en las paredes porosas del canal, usando los gases generados en la combustión. Así al realizar la quema, se limpian las paredes del canal, pero se debe hacer un mantenimiento del sistema cada 120 000 km aproximadamente, garantizando su buen funcionamiento [83], [85].

Figura 11.

Filtros de partículas y paredes del canal



Nota. Representa el tubo o canal donde se hace el proceso de reducción de partículas por medio del filtro implementado en las paredes. Tomado de MIAC Hoja de técnica FAP (2020).

3.2.2 Sistema de Intercambio de calor

Debido a que los gases de combustión del vehículo diésel son expulsados a altas temperaturas (entre 530 y 650° C) [9], es necesario realizar un enfriamiento previo al ingreso de la unidad principal (fotobiorreactor), puesto que la exposición de los microorganismos a altas temperaturas puede causar inhibición o la muerte [56]. En el presente ítem se hablará del sistema de intercambio de calor más adecuado para el diseño, de acuerdo a bibliografía y conocimientos previos adquiridos por los investigadores. Tomando como base que los intercambiadores de calor, son equipos que transfieren energía térmica desde un fluido (gaseoso o líquido) a altas temperaturas a uno de bajas temperaturas (o viceversa), por contacto directo o indirecto [86].

En vista del amplio rango de acción que tienen los intercambiadores de calor, estos poseen diversas clasificaciones, como, de acuerdo al proceso de transferencia, a los mecanismos de transferencia de calor, características de construcción, tipo y cantidad de fluidos involucrados, entre otros [86], [87]; seleccionando para el proyecto el tipo y cantidad de fluidos involucrados en el intercambio de calor, siendo un intercambiador tubular, de calor de contacto indirecto, flexibilidad en el diseño,

resistencia a presiones y temperaturas altas, convección en una sola fase (característica de los enfriadores) y de pasos múltiples [86], [87].

Se optó por esta combinación de características al permitir que las corrientes permanezcan separadas (disminuyendo la posibilidad de contaminación cruzada), mejorar el rendimiento del equipo, diversidad de tamaño y forma, facilidad de limpieza y reparación, permitiendo el tratamiento de sustancias gaseosas de manera eficiente [87], [88]. De esta manera, se propone usar como fluido de enfriamiento aire ideal, es decir que dentro de su composición solo se considerará nitrógeno y oxígeno en una proporción 71: 29 (expresado en porcentaje), a temperatura ambiente en la ciudad de Bogotá (promedio entre 8-18°C). Sin embargo, se debe considerar los cambios que se pueden generar en la atmósfera con la exposición de los gases de salida del intercambiador a altas temperaturas en el ambiente, pese a la pérdida de densidad que presenta el aire a altas temperaturas [89], [90].

A continuación, se presenta las características y condiciones que requiere el intercambiador de calor para su implementación en el diseño propuesto:

3.2.2.a Haz o zona tubular. Es uno de los componentes fundamentales del equipo, al proporcionar la superficie de transferencia de calor entre el fluido que circula por su interior y el que circula por la parte externa o conocido más comúnmente como carcasa. Son construidos en gran diversidad de calidades de acero inoxidable y en casos extremos en aleaciones especiales que soporten condiciones extremas.

3.2.2.b Placa o zona carcasa. Es una placa de metal perforada donde se aloja la zona tubular y contiene el fluido secundario, generalmente es de sección circular y se fabrica de acero o aleaciones de este material, además de disponer de conexiones en la entrada y salida que permitan el paso del fluido enfriador.

3.2.2.c Deflectores. A pesar de ser considerado un accesorio y no una parte fundamental del equipo, ayudan a direccionar el fluido, protegiendo a su vez al equipo, de remolinos internos o fallas de ventilación, por altas velocidades. Son fabricados de materiales iguales o afines a la zona tubular.

3.2.2 d Cabezales desmontables. Son elementos que conectan por ambos extremos la zona tubular y la carcasa, facilitando la circulación del fluido; Suelen estar hechos de aleaciones afines con el material principal del equipo y revestimientos especiales.

Al determinar las partes más importantes del equipo, se prosigue a diseñar la configuración del intercambiador de calor, delimitando el problema y por lo tanto la variable del proceso, que en este caso es el área de construcción, requiriendo a su vez:

- Temperaturas de entrada y salida, del fluido principal (gases contaminantes) y secundario (aire).
- Materiales y características elementales de los mismos, como coeficientes de transferencia.
- Diámetros.
- Propiedades y caracterización de flujos, como tasa de alimentación, capacidades caloríficas, densidades, viscosidades, entre otras.
- Incrustaciones.
- Tipo de arreglo.

A causa de los requerimientos necesarios vistos para realizar la configuración del intercambiador de calor y los limitantes hallados por falta de información y la posibilidad de determinarlos; los investigadores se vieron obligados a tomar fuertes suposiciones con respecto al comportamiento y diseño del equipo propuesto, basándose en documentos con propuestas similares, que brinden una primera aproximación de programación.

3.3 Midstream

Es la etapa más importante, conocida como el corazón del proceso; en este paso se establecen condiciones de corriente a la entrada y la salida del fotobiorreactor, además del control de crecimiento y reproducción de los microorganismos por medio de equipos, lectores o medidores secundarios instalados en este. Teniendo en cuenta que esta etapa tiene 2 posibles puntos de análisis, desde el gasto energético y desde el efecto sobre los microorganismos por las RPM (revoluciones por minuto) usadas [68], [82], la implementación de tecnologías óptimas para el uso de microorganismos es uno de los principales parámetros para desarrollar un correcto

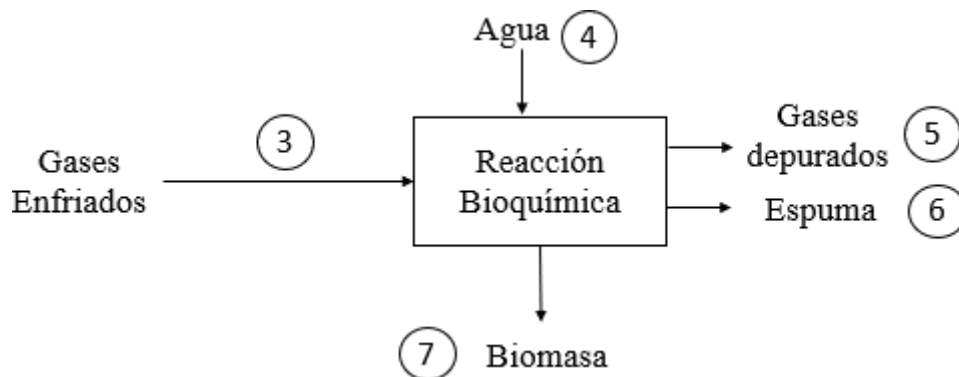
funcionamiento del proceso, por lo cual la elección del equipo correcto es fundamental para llevar a cabo la formación de un cultivo de microalgas, teniendo en cuenta las especies y condiciones a las que serán sometidas [91].

Desde hace aproximadamente 50 años existen comercialmente dos modelos que se han venido usando y modificando de acuerdo con los parámetros requeridos, como lo son los estanques abiertos o cubiertos y tanques cerrados (biorreactores o fotobiorreactores) [91], [92], de los cuales para este proyecto se determinó usar los tanques cerrados, específicamente los fotobiorreactores debido a la ubicación del sistema, condiciones de operación y mejor control del cultivo. A continuación, se presentarán las opciones y la elección del mejor fotobiorreactor para el diseño propuesto.

A continuación, se presenta el diagrama de bloques para esta etapa del proceso, tomando como única operación, la reacción bioquímica, en la cual ingresa la corriente 3, proveniente del proceso anterior (gases enfriados) y la corriente 4 (agua) para un óptimo intercambio de gases; teniendo como corrientes de salida los gases depurados (corriente 5), espuma (corriente 6) y biomasa rica en carbohidratos y lípidos (corriente 7).

Figura 12.

Diagrama de bloques del Midstream



Nota. Representa la operación principal del proceso o corazón del proceso que es la reacción bioquímica a desarrollar.

3.3.1 Fotobiorreactores (FBR)

Los reactores, son tanques en los que se implementan los suministros o insumos necesarios para que ocurra una reacción, en el caso de los fotobiorreactores se tratan los de tanques cerrados (al proporcionar una gran ventaja en cuanto a biofijación de CO₂ [12]) de diferentes áreas en donde el prefijo “BIO” se refiere al uso o desarrollo de seres vivos dentro del equipo, como ocurre al crear cultivos de microorganismos dentro de estos tanques, lo cual los hace especiales [91]; por otro lado, el prefijo “FOTO” hace alusión a la luz, es decir, que este tipo de equipos están diseñados para permitir el paso de luz o para proporcionar algún tipo de luz dentro de ellos, finalmente, estos equipos están diseñados para desarrollar, controlar y monitorear un cultivo con el fin de generar un producto de interés [93].

Teniendo en cuenta la variedad de este tipo de equipos, como los de placa plana, tubulares, columnas de burbujeo o de membrana, se realizó un flujograma de toma de decisiones (Anexo 9), en el cual se escogen los principales modelos de estos equipos según bibliografía, por medio de una tabla de desventajas y ventajas de cada tipo se da paso a la determinación de los criterios de mayor relevancia bibliográfica y argumentativa (Anexo 10); llevando a cabo el desarrollo de la respectiva matriz de decisión y determinando así el tipo de fotobiorreactor más adecuado para desarrollar el proceso.

A continuación, se muestra la tabla de ventajas y desventajas de los 3 tipos de fotobiorreactores con mayor importancia bibliográfica.

Figura 13.

Cuadro Ventajas y Desventajas de los FBR

Placas Planas		Tubular		Membrana	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Alta productividad y bajos costos operacionales	Costos medios de capacidad	Alta productividad debido a sus diversas opciones de ubicación (horizontal y vertical) y	Altos costos operacionales y de capacidad	Son capaces de eliminar mayor cantidad de nutrientes presentes en la corriente de alimento,	Hay que tener mucho cuidado a la hora de escoger el material de la membrana, que se adapte

		forma (helicoidal, valla entre otras).		por lo tanto, tiene altas tasas de productividad	a las cepa o cepas
Buen control de especies y parámetros, especialmente con cultivos densos	Se obtiene mejores resultados con cultivos altamente denso y puros, no con cultivos mixtos y no todas las cepas llegan a ser eficientes	Material de vidrio o plástico flexible y transparente para dar mejor paso de luz	Alto requerimiento de energía para la circulación del cultivo	Tasas de cargas volumétricas más altas, debido a que se encuentra un equilibrio entre el CO ₂ y el O ₂ entonces se elimina la necesidad de CO ₂ adicional.	Complejidad en el diseño y estructura de la membrana, debido a que el material debe tener ciertas propiedades hidrofóbicas alcalinas y demás
Material de vidrio, policarbonato o bolas de plástico para una mejor iluminación	Esta limitado por las fluctuaciones de temperatura para una ampliación a grande escala	Muy buen control de especies y parámetros, debido a que permite una buena eficiencia tanto en cultivos mixtos como puros	Complejidad de diseño a gran escala	Aumentan la concentración de biomasa, la tasa de fijación de CO ₂ y evita que la biomasa salga del reactor	Reducción en penetración de luz al sistema, que genera una disminución en la tasa de crecimiento
Bajo consumo energético y de agua, debido a la alta eficiencia energética que proporciona el sistema	Generación de bio-películas lo cual genera complejidad de mantenimiento	Poca perdida de agua	Complicaciones de mantenimiento, principalmente el ensuciamiento de los tubos que disminuye la eficiencia por un alto flujo turbulento.	Bajos requerimientos energéticos y de suministro de agua	Los periodos de CO ₂ y de abundancia de luz pueden no coincidir entre sí (tanto en espacio y tiempo), por lo cual la tasa de fijación y producción se verá afectada

Bajo oxígeno disuelto acumulado, debido a una alta eficiencia fotosintética	Genera estrés hidrodinámico en la cepa	Óptimas tasas de transferencia de masa y mezcla, dependiendo el modelo	No se recomiendo implementación de luz artificial dentro del sistema por sus altos costos energéticos	Da mejores tasas de crecimiento y producción de biomasa para cultivos mixtos
Bibliografía			[78], [92], [94], [95]	

Nota. Muestra de las principales ventajas y desventajas del diseño de cada tipo de fotobiorreactor, de acuerdo a recopilación bibliográfica.

3.4 Métodos de selección y sus criterios

3.4.1 Criterios

Los criterios tomados en cuenta para la selección del fotobiorreactor, fueron elegidos de acuerdo al Anexo 10, en el cual luego de realizar un análisis bibliográfico, se tomaron 7 criterios fundamentales de acuerdo al proceso a llevar a cabo.

3.4.1.a Sistema de intercambio de gases. Este criterio se ha vuelto de suma importancia, en el desarrollo de los actuales diseños de fotobiorreactores, al evitar la sedimentación de células y la formación de gradientes, así como permitir que todas las células puedan acceder a las zonas iluminadas en el equipo con ayuda del mezclado; el correcto, óptimo y funcional diseño de un sistema de intercambio de gases permite además desoxigenar el medio por efecto de desplazamiento, evitando el efecto de la foto-oxidación [94], [12].

3.4.1.b Recirculación. El objetivo de este criterio es mejorar el flujo y prolongar el contacto de los gases, optimizando la transferencia de masa y la depuración de estos [96], generalmente se realiza mediante un tubo en la parte externa del diseño, creando una recirculación natural tipo reflujo [94]. Este “accesorio” permite aumentar la productividad del sistema, al mover las células de las zonas oscuras centrales (donde no se realiza fotosíntesis), hacia las zonas iluminadas del equipo (donde hay presencia de luz) [72].

3.4.1.c Requerimiento energético. A partir de este criterio es posible analizar y ejecutar el balance de energía, al suministrar las condiciones energéticas básicas que requiere el fotobiorreactor para funcionar de manera óptima [94]. Concediendo la posibilidad de realizar un análisis de costos, al

establecer la energía requerida para que el sistema funcione, determinando además si basta con los acoples realizados al auto o si se requiere de una fuente de energía extra [94], [92], [72].

3.4.1.d Intensidad lumínica. Este criterio es fundamental para el diseño del fotobiorreactor, al impactar de manera directa el optimo crecimiento de los microorganismos (al ser fotosintéticos como se menciona en el capítulo 2). La intensidad lumínica se emplea por vía interna o externa, de manera natural o artificial, este último mediante lámparas fluorescentes o diodos emisores de luz (LED) [94], [12], [69] [96]. Además de esto, es importante ya que define la tasa de crecimiento de los microorganismos, determinando variables de operación del equipo, como temperatura, presión, pH y eliminación de desechos nocivos (como el caso de la espuma).

3.4.1.e Variables, temperatura, presión y pH. Estas variables son de suma importancia, ya que afectan de manera directa el crecimiento de los microorganismos y permiten la medición de otras variables de manera indirecta; el control de estas se realiza con accesorios de manera directa en el fotobiorreactor, usando frecuentemente, termopares, pH-metro y manómetro [97], [98], [78].

3.4.1.f Velocidad del alimento. A pesar de no ser un criterio generalmente relevante, para el presente proyecto significa un criterio de gran utilidad, al brindar información del dimensionamiento del equipo y por lo tanto del diseño, así como de variables de concentración y desconocidas; permitiendo el análisis, creación y ejecución del balance de materia [98], [78]. El valor es variable y depende de manera directa de la fuente contaminante, para el caso a tratar se tomará un valor fijo y constante de 0.0566 L/km³*h (de acuerdo al balance de masa realizado por los investigadores y tomado de la SDA) [8].

3.4.1.g Dimensionamiento. Este criterio es de vital importancia a la hora del escalado, debido a que, según bibliografía teórica y experimental, al aumentar el tamaño, ya sea en su altura o diámetro dificulta la entrada de la luz y aumenta el volumen oscuro, disminuyendo la productividad [94], [96]. Cabe destacar que en el dimensionamiento también se debe tener en cuenta la profundidad que llega a alcanzar la luz, así como los costos de construcción y mantenimiento; realizando un diseño practico, útil y viable, que busque la economía y la simplicidad [96].

3.4.2 Comparación (criterio vs criterio)

Al determinar los criterios de selección para el fotobiorreactor, se realiza el primer paso del método AHP, en el cual se compara mediante una matriz cuadrada los criterios vs criterios, generando una

matriz normalizada, donde se relaciona el valor propuesto con la suma total de cada criterio[66], [7]; determinando los 4 criterios de mayor ponderación, de la misma forma en que fue usada en el capítulo 2, para la determinación de cepas a utilizar en el cultivo mixto.

Tabla 6.

Criterios vs criterios de selección del fotobiorreactor

Criterios	Sistema de intercambio de gases	Recirculación	Requerimiento energético	Intensidad Lumínica	Variable			Porcentaje ponderado del criterio
					Temperatura, presión y pH	Velocidad del alimento	Dimensionamiento	
Sistema de intercambio de gases	1	3	5	3	3	7	5	28%
Recirculación	1/3	1	7	3	3	3	1/3	18%
Requerimiento energético	1/5	1/7	1	1/3	1	1	1/5	4%
Intensidad lumínica	1/3	1/3	3	1	7	5	3	19%
Variables								
Temperatura, presión y Ph	1/3	1/3	1	1/7	1	1	1/3	5%
Velocidad del alimento	1/7	1/3	1	1/5	1	1	1/3	4%
Dimensionamiento	1/5	3	5	1/3	3	3	1	16%
TOTAL	2,54	8,14	23	8,01	19	21	10,20	

Nota. Matriz de criterios vs criterios, en donde se establecen los valores de importancia de cada criterio de acuerdo a los valores dados por la escala Saaty, además de establecer los porcentajes de importancia para evaluar el tipo de fotobiorreactor a utilizar en el diseño de depuración.

En la Tabla 6 se observa la tabla criterios vs criterios y la ponderación obtenida mediante la normalización de la matriz, dando como resultados un 28% para Sistema de intercambio de gases, 19% para Intensidad lumínica, 18% para Recirculación, 16% para Dimensionamiento, 5% para

VARIABLES temperatura, presión y pH y finalmente 4 % para Velocidad del alimento y Requerimiento energético; dando la posibilidad de determinar, que los criterios a tener en cuenta serán los 4 primeros al alcanzar valores superiores al 10% y estando cercanos entre ellos, evidenciando su importancia a la hora de toma de decisiones y satisfaciendo las necesidades que requiere el proyecto con respecto a los microorganismos.

El criterio de sistema de intercambio de gases al ser el de mayor ponderación, indica que la conversión de los gases de combustión en el fotobiorreactor se verá afectada y enmarcada directamente por este, al permitir una óptima transferencia de masa dentro del equipo para lograr una mayor conversión de emisiones de gases de fuentes móviles en productos aprovechables [12], [56], [94].

En el caso de la intensidad lumínica se debe considerar su impacto económico y energético, ya que, al agregar un sistema artificial de luz, se ve afectado el peso del fotobiorreactor y por lo tanto del sistema, así como el aumento del requerimiento energético del vehículo [90], [75]. Además de afectar otros criterios, como el caso del tamaño y materiales para el dimensionamiento.

El tercer criterio a tener en cuenta, es la recirculación, la cual permite un sistema de “agitación” eficiente con respecto a otros tipos (como el de paletas), al no causar daño mecánico a las células, por medio del movimiento adecuado del cultivo a lo largo del fotobiorreactor, permitiendo un óptimo contacto entre las fracciones de luz útiles y las células, generando además un intercambio de gases eficiente al mejorar la transferencia de masa y manteniendo valores de pH y temperatura uniformes [94], [96].

Para finalizar, se tomó el dimensionamiento del equipo, al ser el cuarto criterio de mayor ponderación con un 16%, de acuerdo a la matriz normalizada de criterios vs criterios, el cual permite a los investigadores tomar decisiones de manera directa en el diseño, al influir en materiales, equipos auxiliares, medidores de variables (pH-metro, termómetros, etc), costos de diseño y de mantenimiento, así como escalamiento [96], [94]. Este criterio además permitió el análisis y selección de ubicación del fotobiorreactor (de manera fija en estaciones de alto flujo o sobre los vehículos), explicado en ítems anteriores del presente capítulo.

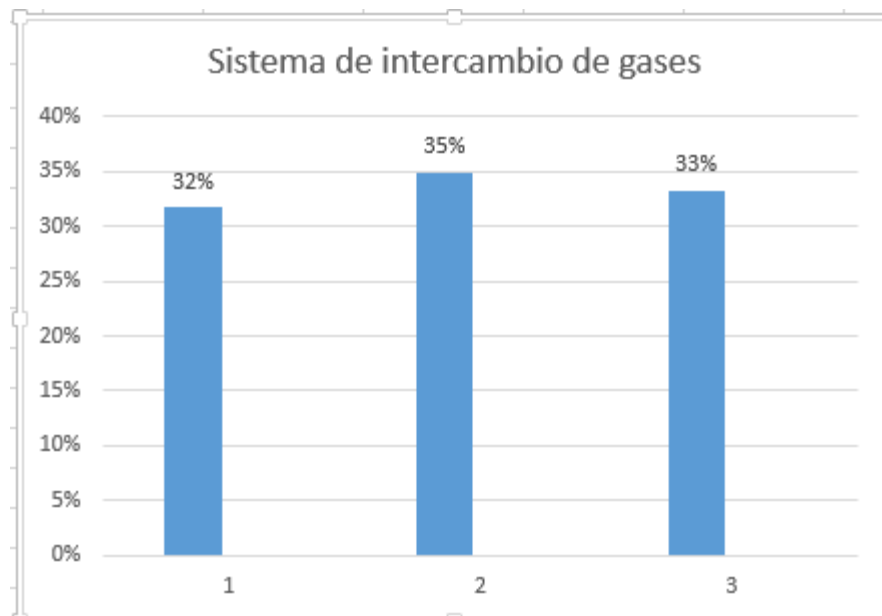
Al determinar los criterios de mayor influencia a tener en cuenta para la elección del fotobiorreactor, se realizan las matrices de comparación de alternativas (tipo de fotobiorreactor)

con respecto a cada criterio elegido, designando una secuencia numérica a cada opción, de la siguiente manera 1 Placas planas, 2 Tubular y 3 Membrana. Considerando que existe gran variedad de fotobiorreactores disponibles en el mercado, así como la facilidad de creación de estos, sin embargo, estos 3 tipos fueron seleccionados, gracias a la diversidad bibliográfica encontrada.

3.4.2.a Criterio de sistema de intercambio de gases. La primera matriz por evaluar es el sistema de intercambio de gases, en la cual de acuerdo a la escala Saaty se asignan valores de importancia a cada tipo de fotobiorreactor; la matriz solución de este criterio se encuentra en el Anexo 11, sin embargo el resumen del resultado se presenta a continuación en la Figura 11 (Resultado matriz sistema de intercambio de gases), donde se observa que el mejor fotobiorreactor para el diseño con respecto a este criterio es el Tubular con un 35%; considerando que las dos opciones restantes ponderaron valores cercanos a este, indicando que al ser tecnologías novedosas, las 3 opciones son viables para el diseño.

Figura 14.

Gráfico resumen criterio intercambio de gases



Nota: Gráfico resumen de la importancia de cada opción de fotobiorreactor con respecto al criterio de sistema de intercambio de gases.

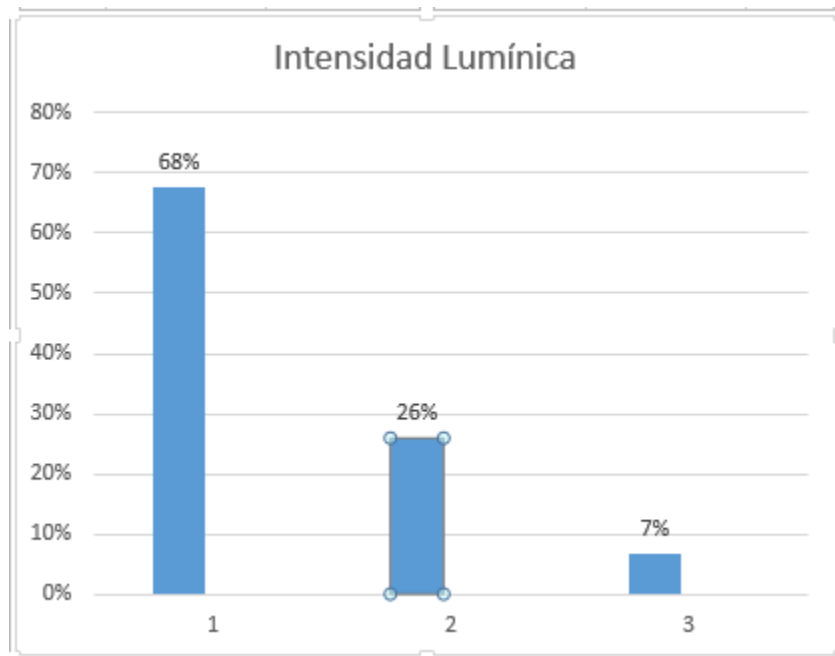
3.4.2.b Criterio intensidad lumínica. El segundo criterio a evaluar de acuerdo a los valores más altos de ponderación, es la intensidad lumínica, la cual para el caso del fotobiorreactor indica

características tanto económicas, como de dimensionamiento; al tratar el tipo de luz (natural o artificial) y la forma a implementación más adecuada para el cultivo mixto, así como materiales que permitan un óptimo paso de luz y una correcta captación de la longitud de onda en los microorganismos [68], [70]. Este criterio es primordial, no solo en la selección del fotobiorreactor, sino en todo el diseño, al intervenir e impactar de manera directa en el cultivo de microalgas y en las características de diseño del reactor a seleccionar [78].

La matriz solución se presenta en el Anexo 12 y el resumen en la Figura 12, en donde se evidencia que el fotobiorreactor con mejor implementación de un sistema de intensidad lumínica es el de placas planas con un 68%, esto se debe a diversas características, de las cuales se resalta que la configuración espacial de este tipo, permite una óptima captación de luz, sin causar foto-inhibición o zonas oscuras al centro del equipo [96], [99].

Figura 15.

Grafico resumen criterio intensidad lumínica



Nota: Gráfico resumen de la importancia de cada opción de fotobiorreactor con respecto al criterio de intensidad lumínica.

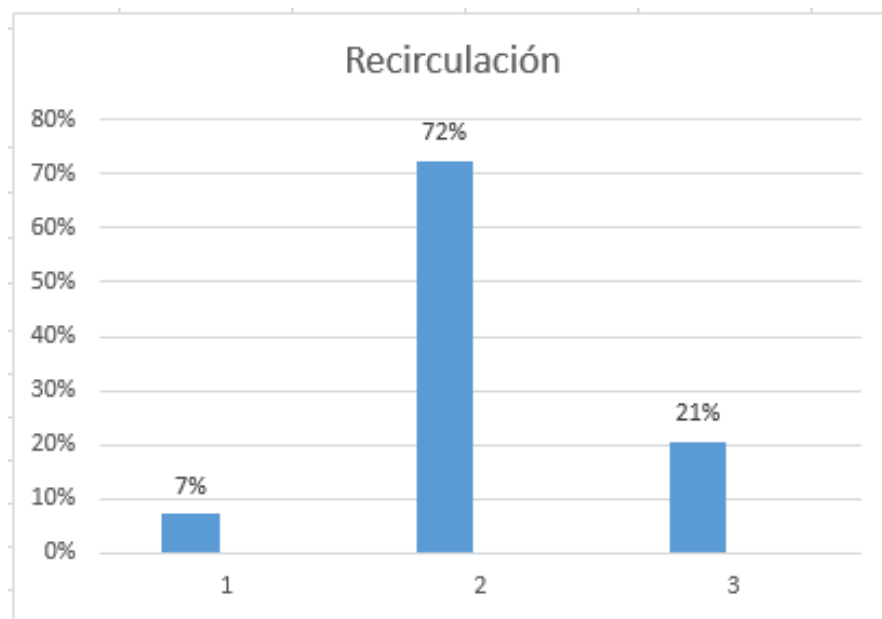
3.4.2.c Criterio recirculación. El tercer criterio con mayor ponderación fue el de recirculación con un 18%, el cual determina que las características fundamentales del equipo se ven influenciadas

de manera significativa, por el tipo y la forma de recirculación que se aplique al fotobiorreactor, ya sea por medio de un burbujeo de la mezcla o por un tubo externo que cumpla esta función. Este criterio brinda también información con respecto al intercambio de gases, al mejorar el flujo y prolongar el contacto entre estos; costos de diseño, al definir el tamaño, ubicación, materiales y similares, junto con costos de mantenimiento, al ser un factor de contaminación y acumulación.

En el anexo 13 se observa la matriz normalizada obtenida para el criterio y en la figura 13 el resumen de la misma, determinando valores ponderados 72% para el fotobiorreactor tubular, 21% de membrana y 7% de placa plana; ofreciendo como fotobiorreactor seleccionado en este criterio el tubular.

Figura 16.

Gráfico resumen criterio Recirculación



Nota. Gráfico resumen de la importancia de cada opción de fotobiorreactor con respecto al criterio de recirculación.

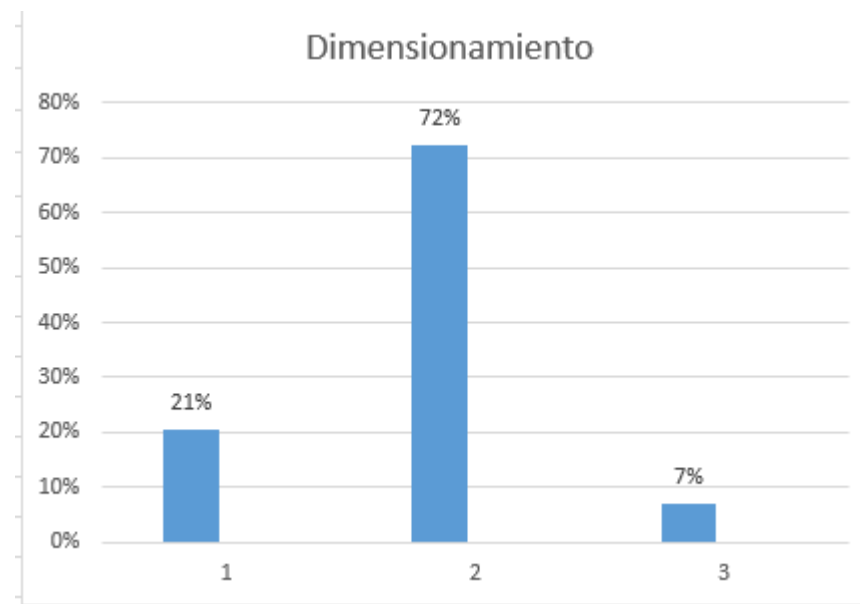
3.4.2.d Criterio de dimensionamiento. Para finalizar el análisis de selección del fotobiorreactor para el diseño del sistema, se tomó el dimensionamiento del equipo con un 16% de ponderación de importancia de criterios en la matriz de selección; este criterio tiene una relevancia alta, dado el hecho de que brinda a los investigadores información con respecto a los materiales, balances,

condiciones de funcionamiento y escalamiento, no solo del equipo sino del sistema de depuración completo, en este caso al afectar de manera indirecta al cultivo mixto [98], [92].

En la figura 14 (resumen criterio de dimensionamiento) se observa que el tipo de fotobiorreactor más adecuado según este criterio es el tubular con un 72%, lo cual se basa en que este tipo de FBR son los más sofisticados y especializados, buscando la simplicidad y la economía; la matriz normalizada se encuentra en el anexo 14.

Figura 17.

Gráfico resumen criterio Dimensionamiento



Nota. Gráfico resumen de la importancia de cada opción de fotobiorreactor con respecto al criterio de dimensionamiento.

3.4.3 Matriz final de la selección del fotobiorreactor

Para finalizar se realiza la última matriz, con el objeto de identificar el fotobiorreactor más adecuado para la reacción principal del diseño de depuración, teniendo en cuenta los resultados obtenidos del análisis de los 4 criterios elegidos (de acuerdo a la ponderación) versus las 3 opciones de fotobiorreactor; para llevar a cabo esto, se hace uso de la función suma producto de Excel, la cual multiplica el valor de cada casilla en la fila de las opciones por los valores hallados en la tabla 9 (criterios vs criterios), para finalmente realizar la suma de estos valores y determinar la opción más viable.

Tabla 7.*Matriz de decisión del fotobiorreactor*

Criterios	Sistema de intercambio de gases	Intensidad Lumínica	Recirculación	Dimensionamiento	Importancia de criterio
Placas	32%	68%	7%	21%	27%
Planas					
Tubular	35%	26%	72%	72%	39%
Membrana	33%	7%	21%	7%	15%
TOTAL	28%	19%	18%	16%	

Nota. Tabla final de selección de fotobiorreactores a usar en el diseño del sistema, a partir de la normalización y suma producto de las columnas obtenidas en las matrices anteriores.

A partir de la matriz final de decisión, se determinó que el mejor fotobiorreactor para la depuración de gases de combustión de fuentes móviles, de acuerdo a los criterios establecidos, es el Tubular con un 39%; valor encontrado tras el uso de matrices de decisión de criterios establecidos, por medio de la metodología AHP.

3.4.4 Reactor seleccionado

El fotobiorreactor seleccionado para la simulación del diseño, de depuración de gases de combustión, es el tubular, debido a características destacadas en 7 criterios de selección tomados por los investigadores. Este tipo de fotobiorreactores (FBR por sus siglas) son los más sofisticados y especializados entre los cerrados, en el ámbito de las microalgas [96], [17]; estos equipos son sustentables, al disponer de una buena área de iluminación, excelente tasa de producción de biomasa y facilidad de manejo de diseño (al cambiar su estructura según se requiera) [17].

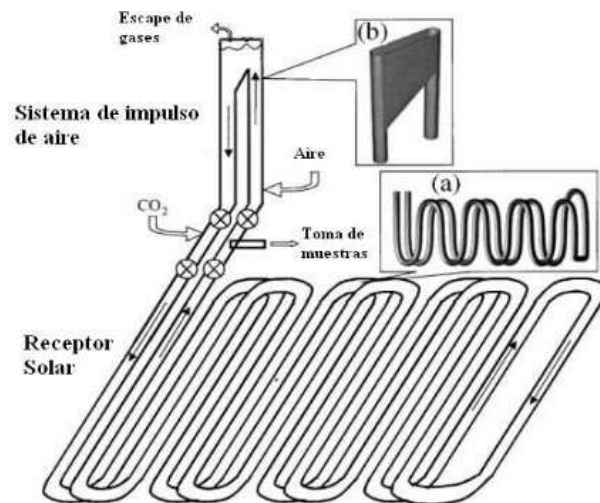
Los FBR tubulares constan de 2 partes principales conocidas como el lazo o receptor solar y el desgasificador o desoxigenación; la primera parte se denomina así, al ser un circuito de tubos dispuestos de manera especial (depende del requerimiento de diseño) que proporcione una forma compacta y poco profunda que permita la captación de luz (natural o artificial), sin tener que preocuparnos por el intercambio de calor y masa, así como el aumento de volumen oscuro en el centro del mismo [68], [96], generalmente consiste en un arreglo de tubos transparentes de vidrio o policarbonato, gracias a su resistencia, transparencia y durabilidad. Por otra parte el

desgasificador es la parte en la que se lleva a cabo el intercambio de masa y energía, la desorción y liberación del O₂ producido por la fotosíntesis, evitando daño fotooxidativo a los microorganismos, mediante la inyección de impulso de aire [100]. Sin embargo, se debe tener en cuenta que al ser un FBR sofisticado y especializado, es más costoso de construir y posee ciertas desventajas al realizar el escalamiento, como el aumento de zona oscura, al aumentar el diámetro del tubo [100].

Al ser el corazón del diseño y tener una alta complejidad, posee equipos auxiliares que realizan la medición de variables como temperatura, presión, pH y producción de gases; mediante el uso de termopares o sensores de temperatura, ya sean de contacto o por medio infrarrojo, para el caso del FBR la mejor opción es el infrarrojo, al evitar contaminación cruzada en el cultivo. En el caso de la medida y control del grado de acidez del cultivo, se usará un pH-metro inalámbrico, el cual permite mantener los parámetros óptimos del cultivo mixto. Así como medidores y controladores de nivel, debido a la formación de espuma y otros accesorios como válvulas, tomadores de muestra y sistemas de escape [100].

Figura 18.

Fotobiorreactor Tubular



Nota. Fotobiorreactor tubular con detalles y sistemas de escape. Tomado de “Diseño, construcción y puesta en marcha de un fotobiorreactor tubular para producir la microalga *Chlorella SP*”. 2015

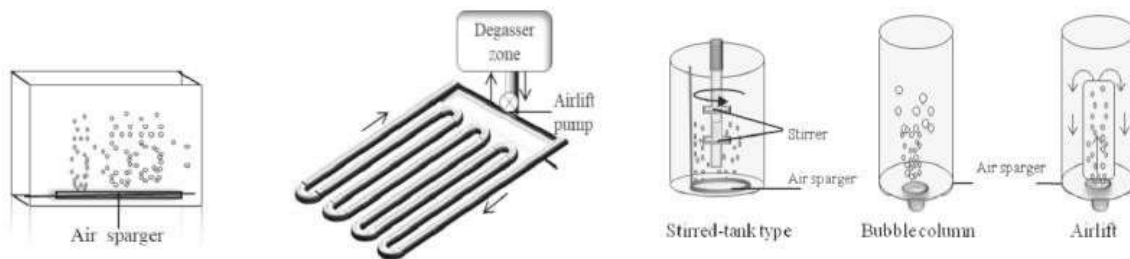
3.5 Sistema de intercambio de gases

El sistema de intercambio de gases fue diseñado para reducir, controlar y supervisar las complicaciones que se desarrollan a la hora de alimentar el CO_2 dentro del fotobiorreactor y los efectos dañinos que genera la obtención de O_2 , debido a que la concentración de CO_2 que requiere el medio de cultivo debe ser constante y la transferencia de masa se ve limitada a la hora del suministro por sus propiedades ya que en estado gaseoso las concentraciones de este nutriente son muy bajas y por ello no se puede generar una biofijación adecuada en el proceso de fotosíntesis por las microalgas [95].

Al ser este un nutriente esencial para la fotosíntesis se busca una difusión óptima de CO_2 en fase líquida y presiones parciales menores a 0.2 kPa aproximadamente, por lo cual se emplean sistemas como la columna de burbujeo en donde dentro del tanque se usa una corriente de burbujeo de aire rica en este nutriente con el único objetivo de proporcionar la cantidad suficiente a través de macro o microburbujas dependiendo el sistema y condiciones requeridas; por otro lado la generación de O_2 es normal en el proceso de fotosíntesis pero las altas concentraciones de este y la exposición del mismo en el cultivo genera inhibición en el crecimiento, por esta razón se implementan dispositivos de aireación y desgasificación, para así desarrollar un sistema de intercambio gaseoso óptimo para el cultivo permitiendo la entrada y salida de los gases requeridos y generados por el sistema [95].

Figura 19.

Sistema de intercambio de gases



Nota. Se observa el sistema de intercambio gaseoso en diferentes tipos de fotobiorreactores, como la columna de burbujeo o la aireación dentro del equipo. Tomado de Enclosed “non-conventional” photobioreactors for microalga production (2020).

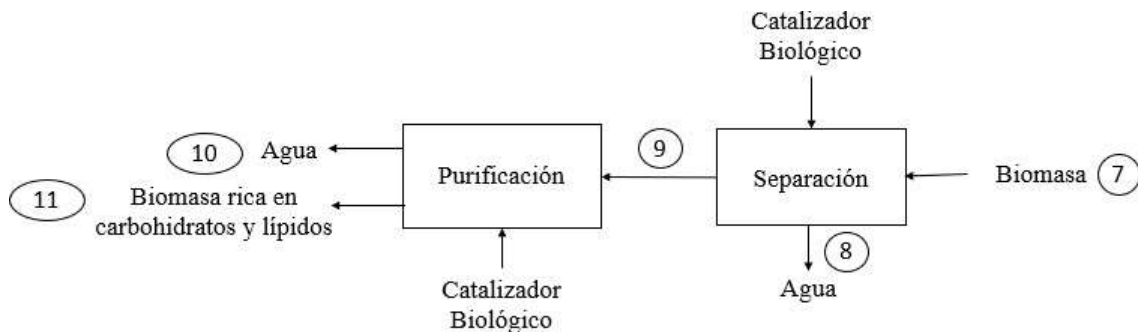
3.6 Downstream

El downstream es la etapa del proceso conocido como aguas abajo, en donde se realizan las operaciones de separación y purificación de los productos, es una etapa especialmente importante en el modelamiento del esquema, al brindar especificaciones de parámetros y variables; además de ser la etapa de recuperación de biomasa microalgal y por lo tanto de productos de sustratos para el desarrollo de valor agregado [68], [82].

Al igual que en las etapas anteriores, para el Downstream se realizó un diagrama de bloques, en el cual se evidencian las operaciones y corrientes involucradas en la etapa final, caracterizándose por contener la purificación y separación de los gases depurados y la biomasa rica en carbohidratos y lípidos, además del uso de un catalizador biológico que facilita la separación de sustancias, sin afectar la composición.

Figura 20.

Diagrama de bloques Downstream



Nota. Se representa las operaciones en la etapa final del proceso, como lo son la separación y purificación de la biomasa.

Como cierre de esta etapa se realizó un balance de materia, el cual se presenta en el Anexo 16 y proporciona la determinación final de trazas de los gases a depurar, además de permitir las posibles opciones de disposición de biomasa, para productos de valor agregado.

3.6.1 Disposición final de la biomasa

Como resultado final del proceso de depuración, se obtiene como producto principal la biomasa, el cual al ser rico en carbohidratos y lípidos, permite el desarrollo de productos de valor agregado,

como biocombustibles, obtención de aceites o productos biotecnológicos [74], [6]. Para el caso a tratar en este proyecto el objetivo principal es la depuración y la correcta disposición de biomasa producida, ya sea como desecho final o para su posterior uso en industrias especializadas [6]. La síntesis de biomasa es un proceso complejo, debido a que generalmente está compuesto por varios elementos como carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, azufre, fósforo, calcio, hierro, magnesio y muchos otros elementos traza en forma química utilizable. Para muchas reacciones biológicas complejas, como la formación de biomasa y la síntesis de producto por la biocatálisis de las células completas, no se conocen todas las reacciones elementales, por lo que se toma como biomasa microalgal rica en carbohidratos y lípidos [82]. Cabe resaltar que el uso de reactores cerrados (como el caso de los fotobiorreactores) presenta ventajas considerables frente a los abiertos, al mantener el cultivo sin contaminación, mejorar el control de las condiciones y requerir una menor inversión de capital en el diseño y mantenimiento del fotobiorreactor [12]. A continuación, se hablará de las 2 etapas principales, correspondientes a la disposición de la biomasa final obtenida.

3.6.1. a Separación de la biomasa. La producción de biomasa microalgal es una importante y prometedora tecnología en cuanto al desarrollo de productos sustentables y renovables, pero debido a las composiciones y bajas concentraciones con las que generalmente llega al final del proceso, se requiere concentrarlas e implementar más de un sistema de separación sólido-líquido [68], estos procesos llegan a ser demandantes y alcanzar hasta el 30% del costo de la obtención de biomasa [68]. Cabe destacar que en caso de realizar en un sistema cerrado, como lo es el fotobiorreactor se presenta varias ventajas respecto a los sistemas abiertos, ejemplo de esto es, mayor facilidad de mantener libre de contaminación a las algas en producción, reducción de las pérdidas de agua por evaporación, aumento de salinidad, obtención de mayores concentraciones celulares y recuperación más fácil de la biomasa [68]. Dentro de las operaciones de separación de biomasa, se resaltan la sedimentación, floculación, filtración y centrifugación [68].

La sedimentación por gravedad es un proceso de recuperación simple y común, que pese a ser rudimentario, se perfila como el más efectivo en relación a su efectividad y costos de ejecución en este tipo de procesos [6]. Sin embargo el uso de floculación complementaria, permite el aumento del tamaño de los agregados y facilita su precipitación u otros procesos de recuperación [68], el propósito de la floculación es neutralizar cargas, que faciliten la agregación entre células, mediante la dispersión de cargas, los floculantes pueden ser cationes multivalentes o polímeros catiónicos;

no obstante el uso de este método posee ciertas desventajas, ya que no pueden ser utilizados para la obtención de productos de alta pureza [6]. La floculación de biomasa es un proceso prometedor en la recolección de algas unicelulares pequeñas, consiste en la adición de gases, que interactúan con la carga de las paredes celulares, permitiendo la separación, dependiendo del tipo de gas a utilizar presenta ventajas o desventajas, referente a costos. Es importante agregar que las microalgas pueden generar un proceso de autofloculación, de manera natural o forzada (limitando la entrada de carbono o de otras corrientes), mediante agregación espontánea [6].

Los procesos de filtración al igual que la sedimentación tienen mayor factibilidad para microalgas de diámetros mayores a los 70 μm , esta se puede realizar al vacío o a presión y consiste en hacer pasar la mezcla sólido-líquido por un agente de retención de la fase sólida [68]. Para microalgas de diámetros inferiores (comparables a los de las bacterias $< 30 \mu\text{m}$), se requiere usar técnicas de filtración por membrana, como la microfiltración y ultrafiltración [68]. Tiende a ser un método con costos elevados, tanto de energía como de diseño, al requerir de procesos adicionales, tiende a usarse para procesos con requerimientos altos de pureza [6].

La centrifugación es una operación rápida, eficiente e intensiva de recuperación de biomasa, pero inviable, debido a su alta demanda energética, poca recolección a gran escala y requerimiento de equipos auxiliares especializados [6], por este motivo es utilizada cuando el producto a obtenerse de la biomasa es de alto valor y la inversión es justificable. Sin embargo a escala pequeña o laboratorio su eficiencia de recolección es superior al 95%, convirtiéndola en un foco de investigación para un continuo avance en el mejoramiento técnico [6].

Esta etapa del Downstream se considera el paso más complejo y costoso del proceso, al depender en gran medida de las características biológicas y técnicas del cultivo [6], así como los requerimientos de concentración y pureza requeridos por ciertas industrias, para el uso de biomasa en productos de valor agregado; además se debe considerar la extensa variedad de opciones y combinaciones que es posible aplicar, por tales motivos en el presente documento solo se presentaron las opciones de mayor estudio, recomendando a futuros estudios profundizar en el tema.

3.6.1.b Purificación de la biomasa. El proceso de purificación de biomasa se encuentra ligado de manera directa con la separación, dado el hecho, de la practicidad que conlleva el uso de un solo equipo, técnica o método que permita purificar las sustancias de interés, al mismo tiempo que

separa los compuestos, trazas o contaminantes. En esta etapa del Downstream generalmente se hace uso de las mismas técnicas o métodos, que en la separación, pero con mayor especificidad, como es el caso de la microfiltración, la ultrafiltración o la nanofiltración, las cuales son técnicas usadas frecuentemente en la industria farmacéutica y alimentaria, debido a los altos niveles de pureza requeridos [101].

La microfiltración (MF) gracias a su tecnología obtiene la separación de sólidos disueltos, eliminación de turbidez y de los microorganismos, la recuperación de macromoléculas y la retención de partículas en suspensión [101]. Se basa en un proceso de filtración, con filtros micrométricos, que oscilan su tamaño entre 0.1 hasta 1 micra y funcionan a presión atmosférica [101].

Por otro lado, la ultrafiltración (UF) consiste en la separación de sustancias desde las de alto peso molecular hasta las de peso bajo, por medio de la aplicación de presión hidrostática para forzar al líquido a pasar por una membrana semipermeable, la cual retiene los sólidos suspendidos y los solutos de alto valor molecular; a comparación de la microfiltración, la UF usa aberturas entre 0,01 y 0,1 micras, permitiendo la eliminación de partículas muy pequeñas, como bacterias u organismos resistentes al cloro, además de menores costos de operación [101].

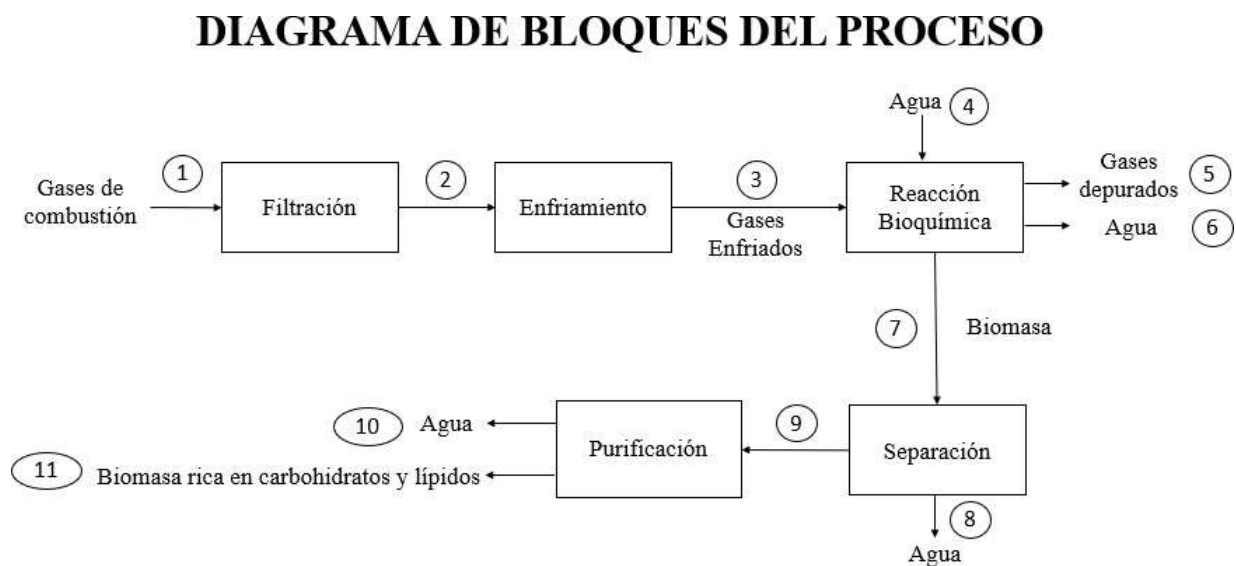
Para finalizar, la nanofiltración es un proceso, que como su nombre lo indica filtra sustancias, de flujo cruzado, por medio de una membrana nanoporosa, de aproximadamente 1nm; Comúnmente se utiliza en aguas de bajo contenido de sólidos disueltos, al eliminar iones polivalentes, mediante la retención de materia orgánica. A diferencia de las 2 técnicas anteriores utiliza presiones media-altas (aproximadamente 75 psi) y no retiene iones monovalentes, además de generar altos costos de producción y mantenimiento, siendo utilizada generalmente en la industria alimentaria y farmacéutica [101].

En resumen, la ruta biotecnológica elegida para el proceso, se desglosa en tres etapas principales: el Upstream o aguas arriba, la cual consta de 2 operaciones unitarias, filtración y enfriamiento; en la primera se realiza la remoción de partículas (antes de salir del tubo escape) y en la segunda el enfriamiento del gas de alimentación al fotobiorreactor, mediante un intercambiador de calor. El Midstream o corazón de proceso, consta de la operación unitaria más importante del sistema, ya que en esta se realiza la depuración de los gases, mediante un fotobiorreactor inoculado por un cultivo mixto de microalgas, además de la producción de biomasa y subproductos (agua y espuma).

Como última etapa, encontramos el Downstream o corrientes abajo, consta de 2 operaciones centradas en el postratamiento de las corrientes de salida, la separación y purificación de la biomasa. Finalmente, se presenta el diagrama de bloques del proceso, con sus respectivas corrientes y operaciones en la Figura 18, con el cual se abre paso al desarrollo del balance general de masa del sistema, centrándose principalmente en el fotobiorreactor, como se puede observar en el Anexo 16.

Figura 21.

Diagrama de bloques de proceso general



Nota. Se representa el diagrama de bloques general del proceso, con todas las operaciones unitarias que se deben realizar dentro del sistema propuesto.

El balance se desarrolló teniendo en cuenta las entradas y salidas del sistema en general como se puede observar en el Anexo 16, en donde el flujo de la corriente de gases emitidos (F_1) es hallado con los cálculos y relaciones previas presentadas en el Anexo 15, el cual toma como referencia el factor de emisión de cada gas emitido para los biarticulados de la Flota Transmilenio para que se lleva a cabo la respectiva relación entre los kilómetros recorridos y los galones consumidos de combustible, y así obtener el flujo inicial de dicha corriente [8], determinando a su vez el ingreso de la corriente F_4 (agua), que es del 30% con respecto al flujo de gases emitidos, dado al hecho que los gases son el reactivo limitante y por lo tanto el agua se representa como el reactivo en exceso; Posteriormente para continuar con el desarrollo del balance, se asume que el caudal de

agua alimentado (F_4) va a ser igual al producido (F_6), a la par que se supone, según la revisión bibliográfica una conversión del 50%, en la medida que en un escalamiento experimental se ha llegado a conocer valores de conversión de un 30%, mientras que para modelamientos y simulaciones con variaciones de la concentración y otras variables se ha llegado hasta un 80%, por ello se toma dicho valor de conversión en función de un promedio entre los datos obtenidos [75], para finalizar el desarrollo del balance, se asume que la corriente inicial de gases emitidos (F_1) se divide en 2 partes iguales en relación con los productos, y a su vez, se supone que todos los compuestos azufrados (SO_2) logran una conversión del 100% a biomasa debido a su baja composición en la corriente alimentada, como se puede observar en la Figura 19.

Figura 22.

Relaciones del Balance de masa



Nota. Relaciones y suposiciones necesarias para llevar a cabo el balance general de masa del sistema.

4. SIMULACIÓN Y DISEÑO DE PROCESO

En la ingeniería básica, el modelamiento de procesos es un requerimiento para llegar a un escalamiento futuro, generalmente es la unión de varias operaciones unitarias, que pueden ser desde las más simples, como una filtración sencilla, hasta las más complejas, como un reacción; para ello existen diferentes programas llamados simuladores, los cuales son creados con el objeto de facilitar la modelación, evaluación y optimización de sistemas diseñado para llevar a cabo el desarrollo de un proceso antes de ser expuestos a un escalamiento [82], [102], [103].

Existe gran variedad de simuladores con características específicas, que permiten adaptarse a diferentes tipos de procesos industriales y sus necesidades, cumpliendo con un objetivo común, pero desarrollando actividades diferentes, como balances, equipos, operaciones y análisis requeridos para el proceso; por esa razón se decide simular el sistema de depuración propuesto con el Software SuperPro Designer Versión 10, seleccionado de acuerdo con una extensa revisión bibliográfica, enmarcando su fácil acceso, compresión del ambiente de simulación y funciones inéditas (como aplicación biológica), con el fin de realizar y obtener los balances, diagramas y demás análisis, reconociendo la viabilidad del proceso propuesto por los investigadores [82]. El programa SuperPro Designer es un simulador profesional de proceso, desarrollado por Intelligent Incorporated y diseñado específicamente para procesos que incluyen componentes biológicos en estado estacionario [102], [104], con el propósito de dar solución mediante un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales, permitiendo predecir la operación de un proceso y facilitando el estudio de sensibilidad [104].

En vista de lo anterior, se procede a realizar la simulación del proceso de biofijación de los gases emitidos por la combustión de un motor Diésel; los gases contaminados son tomados del tubo de escape del vehículo y llevados a un intercambiador de calor (reduciendo su temperatura), para luego ser alimentados al fotobiorreactor, ahora bien el equipo ha sido inoculado con un cultivo mixto de microalgas previamente (donde se lleva a cabo el proceso fotosintético), en último lugar se realiza la separación y disposición de la biomasa obtenida. Se debe tener presente que en el tubo de escape se implementa un sistema de filtros de partículas (el cual fue explicado en el capítulo 3 Metodología, en el ítem Upstream), para evitar el paso de material particulado, ya que puede llegar a afectar el crecimiento microalgal.

Así mismo se debe destacar que para evaluar la viabilidad del proceso, mediante la tasa de biofijación del cultivo, se debe caracterizar los gases a la salida del tubo de escape y asimismo al final de la conversión en el fotobiorreactor, determinando así, si la depuración realizada por los microorganismos cumple con los requisitos legales o por el contrario requiere de procesos adicionales o un cambio de sistema.

El proceso a simular es semi-intermitente, ya que cada 20 a 25 días se debe renovar el cultivo mixto y extraer la biomasa obtenida; pero dadas las limitaciones de simulación y los datos tomados (obtenidos de bibliografía) se asume flujo continuo, en un biorreactor CSTR. Como es posible observar en el diagrama de bloques de proceso, la simulación consta de cuatro equipos principales, de operaciones y propósitos diferentes, cuenta además con un flujo constante e ideal, con un actividad lumínica de 12 horas para mejor el crecimiento del cultivo y parámetros de temperatura, pH e intensidad lumínica especificados en el capítulo 2, por otro lado, el mantenimiento del sistema y la disposición de la biomasa se realizaran paralelamente a la renovación y extracción del cultivo y la biomasa para conseguir un correcto funcionamiento del sistema.

4.1 Cinética de la reacción

En función de desarrollar la cinética de la reacción, se deben tener en cuenta los cálculos previamente realizados para hallar el flujo inicial y el balance de masa, con los cuales se obtuvieron los valores de los flujos de las diferentes corrientes del sistema y concentraciones de los compuestos presentes en el proceso, con el fin de llevar a cabo el cálculo matemático de la cinética de la reacción; En primer lugar se presenta la reacción estequiometría que realiza el fotobiorreactor (Figura 20), dando paso a las relaciones necesarias para hallar la velocidad de reacción.

Ecuación 2.

Reacción estequiométrica



Nota. Representación de la reacción general del sistema, con una estequiometría 1 a 1.

Inicialmente, se toma el término de la velocidad de desaparición de la reacción ($-r_A$) y se deja en términos de la concentración de los reactivos (C_{GE} y C_{H_2O}) y de la constante cinética (k), para partir de la ecuación cinética de diseño de un reactor CSTR, con la intención de concluir el desarrollo

matemático adecuado, llegando a obtener el volumen del reactor, el cual es la variable de diseño para este sistema.

Ecuación 3.

Ecuación de diseño y velocidad de reacción

$$V_{CSTR} = \frac{F_{A\text{Inicial}}}{(-r_A)}$$

$$-r_A = k C_{CO_2} C_{H_2O} \rightarrow G_X = \frac{F_{A\text{Inicial}} (1 - X)}{v}$$

$$V_{CSTR} = \frac{F_{A\text{Inicial}} * X}{k \frac{F_{A\text{Inicial}} * (1 - X)}{v} * \frac{F_{A\text{Inicial}} * (1 - X)}{v}}$$

Nota. La variable de diseño de un reactor tipo CSTR es el volumen, por lo cual se presentan las diferentes relaciones para hallarlo. Tomado de “CO₂ in Seawater - E [105].

Continuando con la cinética, se coloca la velocidad de reacción en función del flujo inicial y la conversión, como se observa en la Ecuación 2, dando paso al desarrollo matemático, tomando los valores ya obtenidos del flujo inicial y la concentración (ver Anexo 15) y reemplazándolos en la expresión dada; mientras que el valor de la constante cinética (k) es tomada del compuesto CO₂ en Seawater-Equilibrium, Kinetics, Isotopes [105], permitiendo proceder a realizar los respectivos cálculos para hallar el volumen del reactor (ver Anexo 17) y así obtener una estimación matemática del volumen del mismo ($V_{CSTR} = 3.75$ L).

4.2 Supuestos y simplificaciones

Debido a la carencia de datos experimentales, como la cinética de crecimiento, constantes de cultivo mixto, tasas de biofijación, entre otros, los investigadores tuvieron que realizar ciertas suposiciones, basadas en los conocimientos adquiridos a lo largo del proyecto y de la carrera; a continuación, se presentan las premisas tomadas con las cuales se llegó al desarrollo de la simulación.

- Inicialmente, para el balance de masa se asume que la cantidad de agua alimentada es igual a la cantidad agua producida, esto debido a las relaciones de micro y macronutrientes que los microorganismos requieren, y por consiguiente el flujo inicial alimentado se divide entre la

corriente de gases depurados y la biomasa en partes iguales, teniendo en cuenta valores de conversión tomados de José C.M Pires en “*Biosequestration of carbon dioxide from flue gases by algae*” [70], Pedro A. Rodriguez Ramos, etc en “*Obtención de biomasa de microalga *Chorella Vulgaris* en un banco de prueba de fotobiorreactores de columna de burbujeo*” [69] y Chaves Jose en “*Caracterización de la fijación del dióxido de carbono presente en una corriente gaseosa con microalgas en un fotobiorreactor*” [12].

- Se tomó como tiempo de proceso del sistema de 20 a 25 días, de acuerdo a los datos suministrados en la página oficial de Transmilenio en la ciudad de Bogotá, usando a su vez el tiempo de actividad de un bus biarticulado en 1 día (19 horas), incluyendo tiempo de arranque y de trayecto a patios.
- Se toma un reactor CSTR teniendo en cuenta que el software en la versión usada tiene limitación de equipos por lo cual no se permitió correr el tren de reactores de tipo intermitente o Batch que se requería para este proceso, además de lo anterior al hacer la búsqueda pertinente para el uso de este simulador se encuentra que este tipo de programa requiere de su versión completa para determinar la variable de diseño del reactor Batch.
- Se realiza una reacción estequiométrica general del proceso, asumiendo una relación estequiométrica 1 a 1, es decir que por una molécula de la mezcla de gases emitidos se produce una molécula de biomasa y una de gases depurados.
- Se asume una conversión de $X = 0.5$, debido a revisión bibliográfica y un promedio de los valores encontrados, ya que para procesos experimentales la conversión oscila entre el 0.3 y el 0.8, teniendo en cuenta los parámetros del sistema [70], [69], [12].
- De acuerdo con la revisión bibliográfica se supone, que se consume en su totalidad las trazas de SO_2 de la corriente de gases contaminantes y se libera en la biomasa, o se consume en el proceso al actuar como micronutriente.
- Se toman valores de Ayusmita en “*A review on co-culturing of microalgae: A greener strategy towards sustainable biofuels production*” [76], con respecto a la *Chlorella*, debido a la decisión de los investigadores de realizar los cálculos del sistema con respecto a esta cepa, al encontrarse con un 19% de proporción en la matriz AHP y ser una de las especies con mayores investigaciones en diversos campos de la industria.

- Se toma una configuración de área global para el sistema de intercambio de calor debido a que no se tiene mucha información al respecto, por lo cual se realiza una configuración sencilla.

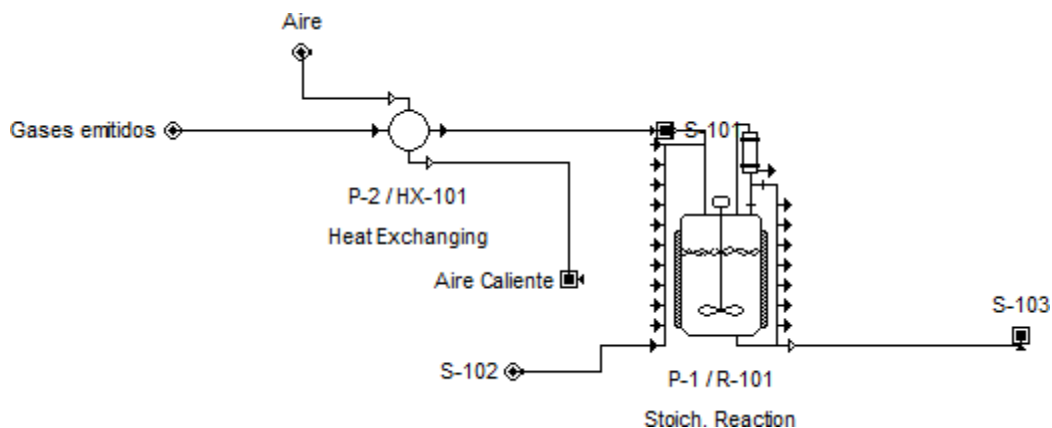
4.3 Simulación

Para iniciar la simulación se debe tener en cuenta la cantidad de equipos a usar y el proceso que se quiere desarrollar, por lo cual para este proceso se contó con tres equipos principales como lo son un intercambiador de calor, un fotobiorreactor y un separador; implicando de manera indirecta un estudio previo de las propiedades requeridas por el simulador para correr el sistema como se menciona anteriormente.

Inicialmente, el proceso fue simulado en el programa SuperPro Designer V 10 en dos ambientes diferentes, debido a que se obtuvo la versión DEMO (para evaluar tomada de “*SuperPro Designer Download Center - Intelligen, Inc*”), por lo cual no se permite el uso de más de dos equipos consecutivos como se puede observar en la Figura 21 y 24; primeramente, se ingresan los compuestos y mezclas requeridas para llevar a cabo el proceso, donde se asignan las diferentes corrientes gaseosas del proceso.

Figura 23.

Ambiente de simulación #1



Nota. Representa el ambiente de simulación inicial, el cual se desarrolla solo con el fin de observar el cambio en las concentraciones con respecto a la disminución de temperatura.

En el primer ambiente propuesto (Figura 21), se procede a simular el intercambiador de calor junto con el fotobiorreactor, donde primero se alimenta una corriente de gas llamada “gases emitidos” al intercambiador con el fin de reducir la temperatura de los gases de 590°C a 30°C, en donde la temperatura inicial es tomada del promedio de temperaturas en las que se llegan a emitir los gases a la salida del exhosto según Ramos [9], por otro lado el flujo inicial es de 0.0566 L/h según el balance de masa realizado y así proseguir con los requerimientos del equipo dentro del simulador, como lo son el coeficiente global de transferencia de calor (U) con un valor de 3200 W/m²K [106] y el factor de corrección entre 0.9 y 1, el cual se varia para observar con qué valor se obtiene la mejor reducción de temperatura, que en este caso sería 0,95 (Figura 22).

Figura 24.

Ventana de especificaciones del intercambiador de calor

HEAT-EXCHANGE-1 (Heat Exchanging) in P-2

Oper.Cond's Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

Flow Type

Countercurrent Cocurrent

Correction Factor | 0,95

Heat Transfer Coeff. | 3200,67 | Watt/m²-K

Heat Transfer Load | 0,00 | kcal/h

Performance Options

Min. Temp. Approach | 5,0 | °C

Hot Stream Temp. Decrease | 560,0 | °C

Cold Stream Temp. Increase | 336,3 | °C

Hot Stream Outlet Temp. | 30,0 | °C

Cold Stream Outlet Temp. | 361,3 | °C

Min Achievable Temp. Approach | 5,00 | °C

Duration

Setup Time | 0,00 | min

Process Time

Set by User | 480,000 | h

Set by Master-Slave Relationship Setup...

Match the duration of this operation to the duration of another operation or string of operations.

Ignore Labor

Pressure Drop

Tube (Main) Stream | 10,000 | bar

Shell (Side) Stream | 7,000 | bar

Nota. Representa los datos necesarios para llevar a cabo la simulación del intercambiador de calor.

Luego se alimentan estos gases enfriados al siguiente equipo (fotobiorreactor), este se encuentra a en el programa como un reactor CSTR estequiométrico, puesto que es alimentado con un flujo continuo en donde se efectúa la reacción de bioquímica ingresando una relación estequiométrica 1 a 1 de la producción de biomasa como se puede observar en la Figura 21, acto seguido se procede a ingresar los datos que requiere el equipo como lo son la temperatura de salida (30°C) ya que el proceso no es adiabático, el fluido de enfriamiento que requiere implementar, en este caso vapor

y la reacción estequiométrica (Figura 23); ahora bien, estas mismas condiciones se mantienen en el ambiente de simulación #2 (Figura 24) a la hora de simular el mismo equipo.

Figura 25.

Ventana de especificaciones del fotobiorreactor

REACT-1 (Continuous Stoich. Reaction) in P-1

Oper.Cond's	Volumes	Reactions	Vent/Emissions	Labor, etc.	Description	Batch Sheet	Scheduling
-------------	---------	-----------	----------------	-------------	-------------	-------------	------------

Thermal Mode

Set Final Temperature 30,0 °C

Adiabatic

Set Duty

Heating 0,03 kcal/h

Cooling 0,00 kcal/h

Power Consumption (for Agitation, etc.)

Power Type Std Power

Set Specific Power 0,0500 kW/m³

Set Total Power 0,0000 kW

Set Power per Unit 0,0000 kW

Power Dissipation to Heat 100,00 %

Heat Transfer

Agent Steam

Inlet Temp. 152,0 °C

Outlet Temp. 152,0 °C

Rate 0,00 kg/h

Heat Transfer Efficiency 100,00 %

Pressure Set by User

Pressure 1,013 bar

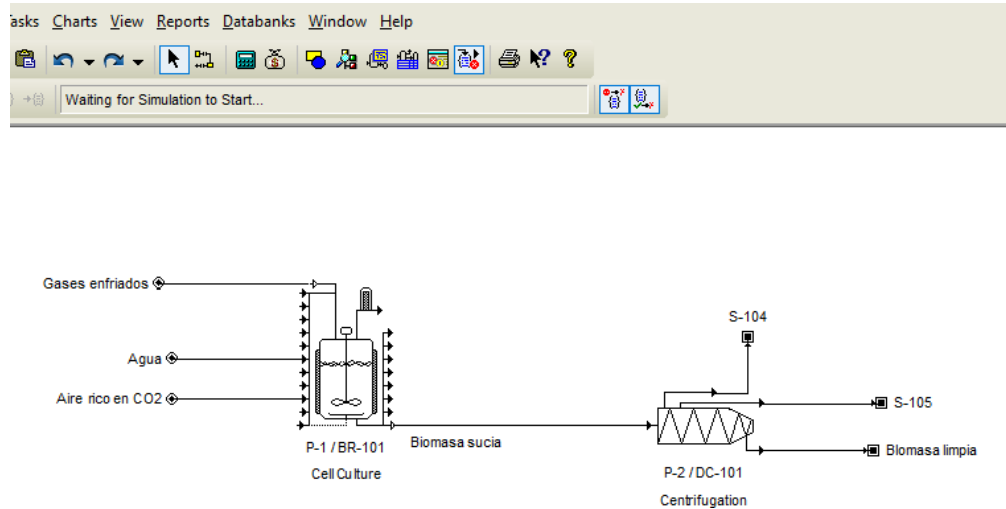
Gaseous Components Available to React

Allow for a Split After Reaction

Nota. Representación de los requerimientos del fotobiorreactor para llevar a cabo la simulación.

Figura 26.

Ambiente de simulación #2



Nota. Representa el segundo ambiente de simulación realizado en el software, el cual se basa principalmente en la simulación del reactor y su posterior separación.

En el segundo ambiente de simulación, se procede a incorporar el fotobiorreactor mencionado anteriormente bajo las mismas condiciones de operación, con un equipo de separación el cual se encuentra en el software como decantador, donde se requieren parámetros como el tamaño de partículas a retirar, el estado del compuesto a retirar, en este caso sólidos y aceites, y algunas propiedades del solvente que por default es agua como se puede observar en la Figura 25.

Figura 27.

Ventana de condiciones del decantador

CENTRIFUGE-1 (Centrifugation) in P-2

Oper. Cond's Mat. Balance Utilities Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

Equipment Design/Rating Is Based On

- Solids Removal
- Oil/Fat Removal
- Solids and Oil/Fat Removal

Limiting Oil Globule Data

Min Diameter 20.00 micron

Density 900.000 g/L

Limiting Solid Particle Data

Min Diameter 1.00 micron

Density 1030.000 g/L

Water (Solvent) Component Data

Density 1000.000 g/L

Viscosity 1.500 cP

Sedimentation Efficiency 30.0 %

Volumetric Throughput per Unit 0.00 L/h

Duration

Setup Time 0.00 min

Centrifugation Time

- Set by User 240.000 min
- Calculated Based on Throughput

Nota. Representación de los parámetros o condiciones de operación necesarios para llevar a cabo el proceso de separación.

Después de correr ambos ambientes se toman los datos de las corrientes de gases y los productos obtenidos del reactor, a su vez se toma el valor del volumen y la composición de los productos obtenidos para poder llevar a cabo la toma de resultados y los respectivos análisis teniendo en cuenta que los datos obtenidos en ambos ambientes de simulación van a ser comparados con el cálculo de volumen realizado previamente y la bibliografía propuesta.

4.4 Análisis

Al simular el sistema de depuración propuesto, mediante Super Pro Designer, se pudo observar la amplia interfaz que posee el software en su versión libre, pero al obtener la versión DEMO o el modo demostración se limitan las opciones de manejo, dificultando el desarrollo y simulación del proceso completo; por lo que se tuvo que dividir el sistema en 2 ambientes de simulación mencionados anteriormente, puesto que esta versión no permite el uso de más de dos equipos a la

vez, lo que conlleva a aumentar el margen de error debido a que el intercambio de datos de un ambiente a otro género variaciones en los resultados obtenidos .

Es posible inferir, que teniendo en cuenta que el valor de conversión tomado de bibliografía para un cultivo mixto y usado para llevar a cabo la simulación es bajo (0.5), la tasa de biofijación de CO₂ obtenida también lo va a ser ya que oscila entre (0.49 – 0.52); pero por otro lado, la tasa de biofijación también se puede ver afectada por el conjunto cepas usadas según la matriz desarrollada, puesto que las cepas seleccionadas en cultivos homogéneos presentan altas tasas de fijación, pero hasta el momento no existen reportes de un cultivo igual, por lo que para un análisis óptimo debería realizarse experimentalmente este cultivo mixto y así identificar si se desarrolla una adecuada adaptación entre ellas.

Tabla 8.

Porcentaje de biofijación con respecto a los datos obtenidos en el simulador

Biofijación de CO ₂ (g/L)			
Ambiente #1		Ambiente #2	
Con Inicial	Con Final	Con Inicial	Con Final
0,019074	0.00953	0,016772	0.00839
Conversión	49%	52%	

Nota. Datos obtenidos de la simulación, con respecto al porcentaje de biofijación obtenido en el ambiente #1 y #2.

Luego de obtener los resultados del volumen del fotobiorreactor en ambos ambientes de simulación y llevarlos a ser comparados con el valor obtenido en los cálculos de diseño se observó, que es un sistema complejo y no tan robusto como se creía inicialmente, que puede ocasionar una mayor demanda energética y una restructuración por parte del vehículo; teniendo en cuenta que las complicaciones de modelamiento y escalamiento en el equipo principal serian a una escala laboratorio o banco, es decir, que el dimensionamiento de este equipo es básico (entre 3 y 4 litros), por lo que no presentarían baja viabilidad del proceso a nivel industrial.

Tabla 9.

Comparación de volúmenes

Comparación de volúmenes (L)		
Calculado	Ambiente #1	Ambiente #2
3,74	4,39	3,09

Nota. Resumen de datos obtenidos con respecto al volumen, en el ambiente #1 y #2 del simulador, así como el calculado en el programa EXCEL.

Se cuestiona los valores obtenidos de biomasa por parte del simulador, pese a que las condiciones de operación ingresadas al sistema, fueron obtenidas por una exhaustiva revisión bibliográfica de procesos similares, más no iguales, no es posible realizar un análisis cuantitativo certero, sino un análisis cualitativo, a partir de los resultados obtenidos en el software utilizado teniendo en cuenta las características de la biomasa obtenida y las halladas según la bibliografía. En consecuencia, se recomienda establecer valores experimentales a la entrada y salida del sistema, por medio de técnicas específicas de análisis de compuestos (como la cromatografía de gases) y de esta forma determinar la composición de las corrientes y la viabilidad del sistema y así determinar la composición de la biomasa y llegar a aportársela a la industria que use ese tipo de biomasa desarrollada como es el caso de los biocombustibles o alimentos para animales.

Puesto que, al ser simulado, el agua alimentada es obtenida como residuos tanto del fotobiorreactor como de la separación de la biomasa se propone hacer una recirculación del agua residual hacia la corriente de alimentación de agua del fotobiorreactor, de igual manera también se podría llevar esta agua residual hacia el mismo automotor para suplir las necesidades del mismo; Juntas opciones como una forma de optimizar el proceso y evitar el deseco de ese fluido.

En síntesis, el desarrollo experimental era un aspecto importante del proyecto ya que con él se hubiera podido estimar de mejor forma algunas condiciones del diseño, como el dimensionamiento puesto que a escala laboratorio se podría observar una primera vista de cómo se llegaría a presentar el sistema en el vehículo y las dimensiones que eso conllevaría, permitiendo a los investigadores analizar qué puntos del proceso propuesto causan complicaciones de diseño; Por consiguiente ir buscando y proponiendo soluciones y cambios al proceso para llegar a considerar si en realidad el

diseño era viable en el automotor, si se podía optimizar o era mejor un diseño ex – situ, donde el proyecto simulado con los cambios establecidos llegará a ser considerado viable.

5. CONCLUSIONES

Se concluye, que gracias a una exhaustiva revisión bibliográfica, mediante diversas bases de datos, como Knovel, Science direct, Lumieres, entre otras, se analizaron cerca de 25 artículos, los cuales brindaron los parámetros de decisión necesarios para llevar a cabo la selección de criterios; haciendo uso de la metodología AHP, la cual provee en términos cualitativos los mejores atributos de selección de cepas, alcanzando de manera paralela una amplia caracterización bibliográfica e ideal de los microorganismos a inocular y sus características, dentro del cultivo mixto.

En cumplimiento con las normas legales vigentes de orden nacional e internacional, como el caso de la resolución 910 del 2008 y las normas Euro vigentes, se desarrolló una ruta tecnológica que permite la depuración de gases de fuentes móviles, específicamente el Diésel en buses biarticulados del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá (Transmilenio); en el mismo orden de ideas, fue necesario la elaboración de una matriz de decisión, la cual de manera objetiva delimitó la selección de equipos y metodologías, haciendo uso de conocimientos ingenieriles de vital importancia.

En consecuencia, a lo presentado a lo largo del documento, se evidencio que la propuesta de diseño planteada, no es viable; puesto que tanto las corrientes de recirculación, como los fluidos auxiliares no se pueden implementar de manera óptima dentro del diseño, al generar demandas energéticas, espaciales y dimensionales. Destacando la adición de peso muerto por parte del sistema, al aumentar el esfuerzo y consumo de combustible por parte del bus y por lo tanto constatar que se requiere una investigación con enfoque hacia una propuesta ex –situ.

Tras el análisis, podemos deducir que el diseño propuesto para la depuración de gases requiere de datos experimentales que permitan determinar la viabilidad de la ruta tecnológica propuesta, ya que, al ser un cultivo mixto no encontrado en bibliografía, no es posible conocer el comportamiento y adaptación de los microorganismos, además de requerir análisis cinéticos, de composición y de dimensión posibilitando cuantificar la viabilidad del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Alvarez, “Alvarez Edwin. 2011. Contaminación ambiental generada por emisiones de gases,” 2011.
- [2] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (Espanya), “Bernaola Manual.2013. Seguridad y salud en el trabajo: revista del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Emisión de gases en motores diesel,” *Insht*, p. 68, 2013, [Online]. Available: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Publicaciones/periodicas/Rev_INSHT/2013/73/SST_73_enlaces2.pdf.
- [3] H. bo Wu, M. xin Xu, Y. bing Li, J. hua Wu, J. chong Shen, and H. Liao, “Experimental research on the process of compression and purification of CO₂ in oxy-fuel combustion,” *Appl. Energy*, vol. 259, no. November, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114123.
- [4] “TransMilenio y la contaminación en Bogotá | Bogota.gov.co.” <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/transmilenio-y-la-contaminacion-en-bogota> (accessed Sep. 28, 2021).
- [5] C. Sebastian Castro Castro, “Demanda energética del sistema de transporte masivo Transmilenio en el horizonte de largo plazo 2020 - 2040,” Accessed: Sep. 29, 2021. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica.
- [6] A. Hernández-Pérez and J. I. Labbé, “Microalgas, cultivo y beneficios,” *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, vol. 49, no. 2, pp. 157–173, 2014, doi: 10.4067/S0718-19572014000200001.
- [7] “Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) – El blog de Víctor Yepes.” <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/> (accessed Oct. 20, 2021).
- [8] Secretaría Distrital de Ambiente, “Secretaria distrital de ambiente. 2018.Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles y fijas,” pp. 1–19, 2019, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>.
- [9] E. A. Q. Ramos *et al.*, “Wearcheck Ibérica. Estudio de la combustión en motores diesel,” *Cent. Desarro. e Investig. en Termofluidos CEDIT*, vol. 02, no. 1, p. 7, 2014, [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ambiente/resolucion/res_2153_0211

10_proto_fuentes_fijas.pdf%0Ahttp://red.ilce.edu.mx/sitios/micrositios/cortazar_aniv/pdf/8_Cielo_Rayuela_libro.pdf%0Ahttp://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/re.

- [10] “Transmilenio. Los nuevos buses de TransMilenio a gas natural comenzaron a salir de Pereira a Bogotá.” <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151281/los-nuevos-buses-de-transmilenio-a-gas-natural-comenzaron-a-salir-de-pereira-a-bogota/> (accessed May 11, 2021).
- [11] A. Emilio, H. Barreto, M. María, J. Correa, A. Ortiz, and C. Montes, “Hoyos Andrés. 2008. Tecnologías reducción de emisiones de gases, cementeras.” *Ing. e Investig.*, vol. 28, no. 3, pp. 41–46, 2010.
- [12] U. D. E. C. Rica, S. A. N. José, and C. Rica, “Chaves Jose. 2014. Caracterización de la fijación del dióxido de carbono presente en una corriente gaseosa con microalgas en un fotobioreactor,” 2014.
- [13] “Genera tu propia energía solar y ahorra | Celsia.” https://www.celsia.com/es/empresas/genera-tu-propia-energia-solar/?gclid=Cj0KCQjw6s2IBhCnARIsAP8RfAgvXlM5MkzW2E77tiS00i0WhtUvizf9ffb7bVbBkmhi3KXKEUyraeoAu0oEALw_wcB (accessed Aug. 11, 2021).
- [14] “Biomitech – Tecnología inspirada en la naturaleza.” <http://biomitech.org/> (accessed Aug. 12, 2021).
- [15] “Biourban, tecnología 100% mexicana para purificar el aire con microalgas.” <https://ecoinventos.com/biourban/> (accessed Aug. 23, 2021).
- [16] K. W. Chew, K. S. Khoo, H. T. Foo, S. R. Chia, R. Walvekar, and S. S. Lim, “Algae utilization and its role in the development of green cities,” *Chemosphere*, vol. 268, p. 129322, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129322.
- [17] G. M. Elrayies, “Microalgae: Prospects for greener future buildings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. September 2017, pp. 1175–1191, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.032.
- [18] “Portal de Exportaciones | Colombia Trade.” <https://www.colombiatrader.com.co/inicio> (accessed Aug. 26, 2021).
- [19] D. M. De, “Estudios de Mercado,” 2012.

- [20] I. Castilla, “Módulo 3. Características Físicas y Químicas del Etanol y Combustibles de Hidrocarburos,” pp. 1–12, 2014, [Online]. Available: <http://www.ethanolresponse.com/wp-content/uploads/2017/08/Guía-del-Participante-Modulo-3-FINAL-2017.pdf>.
- [21] “Ulloque Alejandro. 2021. Ficha técnica Gasolina Motor Extra.,” pp. 1–4, 2021.
- [22] G. Wahrscheinlichkeiten, “Ulloque Alejandro. 2021. Ficha técnica Gasolina Básica Corriente,” pp. 4–8, 2007.
- [23] K. O. Blumberg, M. P. Walsh, and C. Pera, “Blumberg Katherine. 2003. Gasolina y Diesel de bajo azufre.,” *Theicct.Org*, pp. 1–78, 2003, [Online]. Available: https://www.theicct.org/sites/default/files/Bajo_Azufre_ICCT_2003.pdf.
- [24] Arp Sura and Cistema, “SURA. 2011. Características acpm,” pp. 1–7, 2011, [Online]. Available: https://www.arlsura.com/files/distancia_min_almacenamiento_ACPM.pdf.
- [25] “Productos y servicios.” <https://www.terpel.com/en/home-Productos-y-Servicios/> (accessed Aug. 31, 2021).
- [26] “Portal Ecopetrol.” <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal> (accessed Sep. 02, 2021).
- [27] G. Wahrscheinlichkeiten, “Ulloque Alejandro. 2021. Ficha técnica Diesel Extra,” pp. 4–8, 2007.
- [28] “El Gas Natural - Enrique Borrás Brucart - Google Libros.” https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=QKM6R6OInP8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=que+es+el+gas+natural&ots=XvG_ZxnD6a&sig=auPkXlgTumeoqIms8KKY_s_gpt0#v=onepage&q=que+es+el+gas+natural&f=false (accessed May 11, 2021).
- [29] “Gas Natural Vehicular - GNV - Grupo Vanti.” <https://www.grupovanti.com/gas-natural-vehicular-gnv/> (accessed Sep. 02, 2021).
- [30] “Aplicaciones industriales del gas natural | TotalEnergies.” <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/uso-industrial-del-gas-natural> (accessed Sep. 02, 2021).
- [31] F. Guerrero Suárez and F. Llano Camacho, “Caso de estudio. Gas natural en Colombia -Gas e.s.p.,” *Estud. Gerenciales*, no. 87, pp. 115–146, 2003.

- [32] “Gas natural | Shell Colombia Colombia.” <https://www.shell.com.co/energia-e-innovacion/gas-natural.html> (accessed Sep. 07, 2021).
- [33] “¿Gas natural o Propano?: Precios y diferencias entre GLP y GNL.” <https://propanogas.com/faq/propano-vs-gas-natural> (accessed Sep. 07, 2021).
- [34] Ramírez Camacho Juan Andrés and Rodríguez Pava Sebastián Camilo, “Conveniencia de la Producción de Biodiesel en Colombia desde la Perspectiva del Desarrollo Sostenible,” *Univ. Catol. Colomb.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–40, 2019, [Online]. Available: [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23602/1/Conveniencia de la producción de biodiesel en Colombia desde la perspectiva del desarrollo sostenible.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23602/1/Conveniencia%20de%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biodiesel%20en%20Colombia%20desde%20la%20perspectiva%20del%20desarrollo%20sostenible.pdf).
- [35] Patrianus Khristian Sumule, “Díaz Yeni.2012.Impacto ambiental Biodiesel,” *Экономика Региона*, vol. 2, no. July, p. 32, 2012.
- [36] “¡Llegaron los nuevos buses Euro VI!” <https://www.sitp.gov.co/publicaciones/91120/llegaron-los-nuevos-buses-euro-vi/> (accessed Sep. 08, 2021).
- [37] J. Mantilla González, J. Roncancio, and C. Galeano Urueña, “Desempeño y emisiones de un motor de combustión interna concombustible dual Diesel-Gas natural,” *Ing. Energética*, vol. XXXVI, no. 1, pp. 27–37, 2015.
- [38] A. Arevalo and G. Hernandez, “Motores de combustión interna.”
- [39] “Glosario de términos | Hello Auto.” <https://helloauto.com/glosario> (accessed Sep. 14, 2021).
- [40] D. Sebastian and C. Vargas, “transporte Transmilenio en la ciudad de Bogotá,” p. 53, 2018.
- [41] S. Mobin and F. Alam, “Some promising microalgal species for commercial applications : A review,” *Energy Procedia*, vol. 110, no. December 2016, pp. 510–517, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.177.
- [42] M. B. Structures, “No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title.”
- [43] “Gases de efecto invernadero – Observatorio Boliviano de Cambio Climático y ‘Desarrollo.’” <https://obccd.org/gases-de-efecto-invernadero-co2e-co2-y-carbono/> (accessed Jan. 28, 2022).

- [44] “Diseño Motores diesel,” *North-holl. Ser. Appl. Math. Mech.*, vol. 23, no. C, pp. 1–145, 1978, doi: 10.1016/B978-0-444-85043-0.50007-X.
- [45] 北村純一 *et al.*, “Hernandez Alvaro. 2010. Inventario de emisiones F.M CO2 en bogotá.,” *Japanese J. Rehabil. Med.*, vol. 34, no. 3, pp. 234–235, 1997.
- [46] S. Jaramillo, “Impacto Sobre La Calidad Del Aire De La Renovación De La Flota De Transmilenio: Exposición De Los Usuarios Y Factores De Emisión. Linea Base,” 2019.
- [47] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, “Resolucion 910 De 2008,” *Resoluc. 910 2008*, p. 36, 2008, [Online]. Available: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/f0-Resolución 909 de 2008 - Normas y estandares de emisión Fuentes fijas.pdf>.
- [48] D. Transporte, “Congreso de Colombia.2008. Ley 1205 calidad de diesel,” no. 1205, 2012.
- [49] PNUD, “Protocolo de Montreal | PNUD,” *Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo*, 2021. 978-9966-076-16-8.
- [50] “Protocolo de Montreal | PNUD.” <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development/environment-and-natural-capital/montreal-protocol.html> (accessed Oct. 19, 2021).
- [51] “Gestión - IDEAM.” <http://www.siac.gov.co/climaticogestion> (accessed Oct. 20, 2021).
- [52] “Glosario ambiental: ¿Sabes qué se pactó en el Acuerdo de París? | WWF.” <https://www.wwf.org.co/?334976/Glosario-ambiental--Sabes-que-se-pacto-en-el-Acuerdo-de-Paris> (accessed Oct. 20, 2021).
- [53] “Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 ‘Pacto por Colombia, pacto por la equidad.’” <https://www.dnp.gov.co/DNPN/Paginas/Plan-Nacional-de-Desarrollo.aspx> (accessed Oct. 20, 2021).
- [54] “La política de medio ambiente: principios generales y marco básico | Fichas temáticas sobre la Unión Europea | Parlamento Europeo.” <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/71/la-politica-de-medio-ambiente-principios-generales-y-marco-basico> (accessed Oct. 20, 2021).

- [55] F. G. A. Fernández, A. Reis, R. H. Wijffels, M. Barbosa, V. Verdelho, and B. Llamas, “The role of microalgae in the bioeconomy,” *N. Biotechnol.*, vol. 61, pp. 99–107, 2021, doi: 10.1016/j.nbt.2020.11.011.
- [56] MPOC, “Díaz y Guerrero, 2020, Evaluación de la capacidad de biofijación de CO₂ de un cultivo de microalgas en un proceso de combustión fija,” *Malaysian Palm Oil Counc.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: <http://mpoc.org.my/malaysian-palm-oil-industry/>.
- [57] H. A. Yusuf, S. M. Z. Hossain, A. A. Khamis, H. T. Radhi, and A. S. Jaafar, “Optimization of CO₂ biofixation rate by microalgae in a hybrid microfluidic differential carbonator using response surface methodology and desirability function,” *J. CO₂ Util.*, vol. 42, no. July, p. 101291, 2020, doi: 10.1016/j.jcou.2020.101291.
- [58] L. J. Rendón Castrillón, M. E. Ramírez Carmona, and Y. Vélez Salazar, *Microalgas para la industria alimenticia*. 2015.
- [59] “Pedraza y Prada, Evaluación de la biofijación de co₂.pdf.” .
- [60] L. Vinet and A. Zhedanov, “Aislamiento de microalgas mixotróficas/Aguas Residuales,” *J. Phys. A Math. Theor.*, vol. 44, no. 8, pp. 1689–1699, 2011, doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.
- [61] H. Berberoglu, P. S. Gomez, and L. Pilon, “Radiation characteristics of *Botryococcus braunii*, *Chlorococcum littorale*, and *Chlorella* sp. used for CO₂ fixation and biofuel production,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 110, no. 17, pp. 1879–1893, 2009, doi: 10.1016/j.jqsrt.2009.04.005.
- [62] M. Diaconu, *Microalgae with potential in air treatment*. INC, 2020.
- [63] S. & Mehmood, “Us, 2011, Efecto de la limitación de N₂ y P en la producción de lípidos en cultivos de las microalgas verdes *Scenedesmus* sp,” vol. 16, no. 22, pp. 119–128, 2011.
- [64] E. M. Tejada Carbajal, E. Martínez Hernández, L. Fernández Linares, E. Novelo Maldonado, and R. Limas Ballesteros, “Techno-economic analysis of *Scenedesmus dimorphus* microalgae biorefinery scenarios for biodiesel production and glycerol valorization,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 12, p. 100605, 2020, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100605.

- [65] A. Pugazhendhi *et al.*, “Biodiesel from *Scenedesmus* species: Engine performance, emission characteristics, corrosion inhibition and bioanalysis,” *Fuel*, vol. 276, no. April, p. 118074, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118074.
- [66] A. Gide, “Evaluación de una propuesta tecnico financiera de limpieza para los niveles de cadmio presentes en el proceso de producción del chocolate de la planta industrial de cacao luker,” *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951–952., pp. 5–24, 1967.
- [67] H. X. Chang, Y. Huang, Q. Fu, Q. Liao, and X. Zhu, *Kinetic characteristics and modeling of microalgae *Chlorella vulgaris* growth and CO₂ biofixation considering the coupled effects of light intensity and dissolved inorganic carbon*, vol. 206. Elsevier Ltd, 2016.
- [68] F. M. Ayora, “Procesos de Upstream y Downstream en la producción de biomasa de microalgas,” *Univ. SAN Fr. Quito Col. Ciencias e Ing. Procesos*, p. 57, 2015, [Online]. Available: <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/4160/1/113904.pdf>.
- [69] P. A. R. Ramos *et al.*, “Obtención de biomasa de microalga *Chlorella vulgaris* en un banco de prueba de fotobiorreactores de columna de burbujeo,” *Afinidad*, vol. 73, no. 574, pp. 125–129, 2016.
- [70] J. C. M. Pires, “Biosequestration of carbon dioxide from flue gases by algae,” *Adv. Feed. Convers. Technol. Altern. Fuels Bioprod. New Technol. Challenges Oppor.*, pp. 105–118, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-817937-6.00006-0.
- [71] M. Bhattacharya and S. Goswami, “Microalgae – A green multi-product biorefinery for future industrial prospects,” *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 25, no. March, p. 101580, 2020, doi: 10.1016/j.bcab.2020.101580.
- [72] A. Maximiliano, L. Biotechnología, G. Daniel, L. Biotechnología, F. Costa, and A. Eduardo, “Proyecto final de ingeniería de microalgas en un fotobiorreactor Tutor: Co-Tutor: Agradecimientos,” 2016.
- [73] A. Juneja, R. M. Ceballos, and G. S. Murthy, “Effects of environmental factors and nutrient availability on the biochemical composition of algae for biofuels production: A review,” *Energies*, vol. 6, no. 9, pp. 4607–4638, 2013, doi: 10.3390/en6094607.

- [74] J. E. Abalde Alonso, A. Cid Blanco, J. P. Fidalgo Paredes, J. E. Torres Vaamonde, and C. Herrero López, *Microalgas: Cultivo y aplicaciones*. 1995.
- [75] F. Almomani, “Kinetic modeling of microalgae growth and CO₂ bio-fixation using central composite design statistical approach,” *Sci. Total Environ.*, vol. 720, p. 137594, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137594.
- [76] A. Ray, M. Nayak, and A. Ghosh, “A review on co-culturing of microalgae: A greener strategy towards sustainable biofuels production,” *Sci. Total Environ.*, vol. 802, p. 149765, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149765.
- [77] J. Zeng, Z. Wang, and G. Chen, “Biological characteristics of energy conversion in carbon fixation by microalgae,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 152, no. January, p. 111661, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111661.
- [78] E. S. Umdu and Y. Univ, *Building integrated photobioreactor*. LTD, 2020.
- [79] J. Cheng, Y. Zhu, Z. Zhang, and W. Yang, “Modification and improvement of microalgae strains for strengthening CO₂ fixation from coal-fired flue gas in power plants,” *Bioresour. Technol.*, vol. 291, no. May, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121850.
- [80] N. Janine, G. Cantor, U. D. La Salle, A. Maria, and C. Rodriguez, “Ciencia Unisalle Determinación de factores de emisión de PM_{2.5} y Black Carbon de buses de Transmilenio durante el proceso de renovación de flota,” 2021.
- [81] L. Urbiztondo and G. Mirada, “Ministerio de ambiente Perú. 2016. Preguntas y respuestas Euro iv,” *Vacunas*, vol. 17, no. 1, pp. 27–29, 2016, doi: 10.1016/j.vacun.2016.03.004.
- [82] G. Roberto, “Ingeniería de los procesos biotecnológicos,” *Ing. los procesos biotecnológicos*, 2018.
- [83] U. Técnica and D. E. L. Norte, “Universidad técnica del norte,” 2018.
- [84] “Filtros de partículas disminuyen emisión de gases de buses de Transmilenio en un 97%.” https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/147257/filtros_de_particulas_disminuyen_emision_de_gases_de_buses_de_transmilenio_en_un_97/ (accessed Nov. 17, 2021).
- [85] D. De, “El sistema de filtro de partículas FAP.”

- [86] C. Jacobo, “Design and Analysis of a Heat Exchanger,” p. 73, 2018.
- [87] J. E. Sthormes, R. Jrs, and C. Felipe Sánchez, *Guía de intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones Related papers Int ercambiadores-de-calor-t ipos-generales-y-aplicaciones-110623210009-phpapp01*. 2002.
- [88] R. Martínez, “Guía Para Seleccionar Intercambiadores De Calor,” *Tlatemoani*, no. 6, 2011.
- [89] “Temperatura - meteoblue.” <https://content.meteoblue.com/es/meteoscool/el-tiempo/temperatura> (accessed Mar. 31, 2022).
- [90] J. Pabón, J. Zea, G. León, G. Hurtado, O. C. Gonzáles, and J. Montealegre, “El medio ambiente en Colombia,” *El Medio Ambient. en Colomb.*, pp. 92–113, 2004, [Online]. Available: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap3-ii.pdf>.
- [91] M. Fernández, “Diseño, montaje y caracterización de fotobiorreactores airlift para el cultivo de la microalga *Chlorella sorokiniana*,” p. 47, 2013.
- [92] U. Suparmaniam, M. K. Lam, Y. Uemura, J. W. Lim, K. T. Lee, and S. H. Shuit, “Insights into the microalgae cultivation technology and harvesting process for biofuel production: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 115, no. January, p. 109361, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109361.
- [93] D. Rubio Fernández and H. L. Moreno Saboya, “Agitación y transferencia de masa de CO² en fotobiorreactores tipo airlift,” *Rev. Invest. (Guadalajara)*, vol. 10, no. 2, pp. 49–62, 2017, doi: 10.29097/2011-639x.81.
- [94] R. Muñoz, “Los fotobiorreactores de microalgas : Un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales Microalgal photobioreactors : A resource for the tertiary treatment of wastewater,” vol. 22, pp. 13–25, 2019.
- [95] J. Assunção and F. X. Malcata, “Enclosed ‘non-conventional’ photobioreactors for microalga production: A review,” *Algal Res.*, vol. 52, no. October, 2020, doi: 10.1016/j.algal.2020.102107.

- [96] “Fotobiorreactores para el cultivo masivo de microalgas.” <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-7-fotobiorreactores.html> (accessed Jan. 20, 2022).
- [97] Y. González-Lazo, P. A. Rodríguez-Ramos, Y. Sánchez-Borroto, A. Teresa-Lombardi, and C. Candido, “Diseño y simulación de un fotobiorreactor para el cultivo de la microalga *Chlorella Vulgaris*,” *Diseño y simulación un fotobiorreactor para el Cultiv. la microalga Chlorella Vulgaris // Des. Simul. a photobiorreactor Cultiv. microalga Chlorella Vulgaris*, vol. 22, no. 3, pp. 169–177, 2019.
- [98] J. Ruiz, “Estudio De Fotobiorreactor De Microalga : Sistema De Estrategias De Control,” pp. 1–79, 2015, [Online]. Available: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2733/IME_190.pdf?sequence=1.
- [99] C. Pedraza and C. Garavito, “Evaluación de la biofijación de CO₂ y producción de biomasa a partir de las microalgas bajo condiciones de fotobiorreactor a escala laboratorio,” *Fund. Univ. América*, pp. 1–26, 2018.
- [100] F. Tubular, P. Producir, L. A. Microalga, and C. Sp, “Luz Solar,” vol. 30, no. 1, pp. 28–49, 2015.
- [101] Shen Fangzhu, “Separación de biomasa y productos (ácido láctico y ácido lactobiónico) por microfiltración.” [https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/29277/TFM_Fangzhu Shen.pdf;jsessionid=DF9F88F39B4A78BD3F8DF55C973A5AE7?sequence=6](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/29277/TFM_FangzhuShen.pdf;jsessionid=DF9F88F39B4A78BD3F8DF55C973A5AE7?sequence=6) (accessed Jan. 24, 2022).
- [102] I. B. Cortes, *Simulación de procesos químicos y aplicaciones del simulador SuperPro Designer*, no. October. 2020.
- [103] “Diseño y simulación de un fotobiorreactor para el cultivo de la microalga *Chlorella Vulgaris*.” <https://www.redalyc.org/journal/2251/225160761008/html/> (accessed Oct. 13, 2021).
- [104] S. Designer, “Manual SuperPro.” .

- [105] “2. Kinetics - Knovel.” [https://app-knovel-com.ezproxy.uamerica.edu.co/web/view/khtml/show.v/rcid:kpCOSEKI01/cid:kt004QBN25/viewerType:khtml//root_slug:2-kinetics/url_slug:kinetics?b-q=kinetic constant of co2&b-toc-cid=kpCOSEKI01&b-toc-title=CO² in Seawater - Equilibrium Kinetics Isotopes&b-toc-url-slug=kinetics&include_synonyms=no&view=collapsed&zoom=1&page=1](https://app-knovel-com.ezproxy.uamerica.edu.co/web/view/khtml/show.v/rcid:kpCOSEKI01/cid:kt004QBN25/viewerType:khtml//root_slug:2-kinetics/url_slug:kinetics?b-q=kinetic+constant+of+co2&b-toc-cid=kpCOSEKI01&b-toc-title=CO%3Csub%3E2%3C%2Fsub%3E+in+Seawater+Equilibrium%2C+Kinetics%2C+Isotopes&b-toc-url-slug=kinetics&include_synonyms=no&view=collapsed&zoom=1&page=1) (accessed Jan. 31, 2022).
- [106] “Juan José Montesinos,” 2009.
- [107] W. G. Morais Junior, M. Gorgich, P. S. Corrêa, A. A. Martins, T. M. Mata, and N. S. Caetano, “Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing,” *Aquaculture*, vol. 528, no. January, p. 735562, 2020, doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735562.
- [108] W. S. Chai, W. G. Tan, H. S. Halimatul Munawaroh, V. K. Gupta, S. H. Ho, and P. L. Show, “Multifaceted roles of microalgae in the application of wastewater biotreatment: A review,” *Environ. Pollut.*, vol. 269, p. 116236, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116236.
- [109] “Dominguez, Outdoor performance of CL.pdf.”
- [110] “Ota, Effects of light intensity.pdf.”
- [111] T. N. Verma *et al.*, “The effect of ethanol-methanol-diesel-microalgae blends on performance, combustion and emissions of a direct injection diesel engine,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 42, no. October, p. 100851, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100851.
- [112] G. V. Swarnalatha, N. S. Hegde, V. S. Chauhan, and R. Sarada, “The effect of carbon dioxide rich environment on carbonic anhydrase activity, growth and metabolite production in indigenous freshwater microalgae,” *Algal Res.*, vol. 9, pp. 151–159, 2015, doi: 10.1016/j.algal.2015.02.014.
- [113] G. Kumar, M. Huy, P. Bakonyi, K. Bélafi-Bakó, and S. H. Kim, “Evaluation of gradual adaptation of mixed microalgae consortia cultivation using textile wastewater via fed batch operation,” *Biotechnol. Reports*, vol. 20, pp. 0–6, 2018, doi: 10.1016/j.btre.2018.e00289.

- [114] F. Hussain *et al.*, “Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 137, no. November 2020, p. 110603, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110603.
- [115] Y. J. Lee and Z. Lei, “Microalgal-bacterial aggregates for wastewater treatment: A mini-review,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 8, no. April, p. 100199, 2019, doi: 10.1016/j.biteb.2019.100199.
- [116] G. Fernando, G. Sánchez, J. Luis, C. Velasco, and A. C. Guerrero, “García Gabriel. 2013. Modelado de la combustión en motores Diésel.,” *Rev. Ion*, vol. 26, no. 1, pp. 41–54, 2013.
- [117] J. Luis, S. Romero, R. Arturo, N. Peñaranda, U. Autonoma, and D. E. L. Caribe, “Sanabria Jose. 2014. Caracterizacion de las microalgas para la produccion de biodiesel.,” 2014.

ANEXOS

ANEXO 1

CUADROS DE REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

Figura 28.

Cuadro Familias de Microalgas

FAMILIAS DE MICROALGAS											
Microalga		Fuente de emisiones	Tratamiento		Sistemas de producción	Producción de biomasa	Tasa de fijación de CO ₂	Aplicación industrial	Ventajas	Desventajas	Fuente bibliográfica
Familia	Especie		Agua residual	Biofijación de CO ₂							
<i>Botryococcus</i>	<i>Botryococcus Braunii</i>	Móvil/Fija		X	Cerrado	0.019-0.3	0.5	Producción de biocombustibles	Potencial para secuestro de CO ₂ y producción de biocombustibles por su alto contenido de lípidos.	A grandes concentraciones de CO ₂ baja tasa de rendimiento y presenta mejor producción de biomasa en ausencia de N ₂ .	[73], [61], [62], [107]
<i>Chlorella</i>	<i>Chorella Vulgaris</i>	Móvil	X	X	Abierto	0.105	0.2-0.8	Suplementos, proteínas, productos de	Presenta potencial para	Se inhibe con corrientes	[75], [41], [62].

								cuidado personal, cosmética	secuestro de CO ₂ y producción de biocombustibles; alta tolerancia al N y P	ricas en CO ₂ , mayores a 20% v/v y temperaturas mayores a 30°C	
	<i>Chorella Sorokiniana</i>	Móvil	X	X	Abierto	1.445	0.421	Suplementos, proteínas, productos de cuidado personal, cosmética	Presenta mayor producción y alto rendimiento de biomasa a altas concentraciones de CO ₂	No posee una tolerancia óptima para las aguas residuales o industriales.	[41], [61], [62], [108], [79].
<i>Chlorococcum</i>	<i>Chlorococcum littorale</i>	Móvil/Fija		X	Abierto	0.64-1.04	0.85	Suplementos, Proteínas, productos de cuidado personal.	Tiene tolerancia a altas concentraciones de CO ₂ .	Tiene baja tolerancia al agua residual y tasas de crecimiento altas en privación de N ₂	[73], [61], [109]

<i>Chamydomonas</i>	<i>Chamydomonas reinhardtii</i>	Fija		X	Cerrado	0.13-1.14	---	Farmacéutica, biocombustibles	Alta producción de biomasa para biocombustibles por su contenido en lípidos.	No tolera altas concentraciones o corrientes ricas en CO ₂	[73], [108]
<i>Dunaliella</i>	<i>Dunaliella Salina</i>	Fija/Móvil		X	Abierto	0.05-0.1	0.63	Producción de beta-carotenos, farmacéutica y alimentos.	Estas especies pueden vivir en un amplio rango y concentraciones de productos químicos	Requiere de un porcentaje mínimo de salinidad en el agua.	[55], [41], [70]
<i>Nannochloropsis</i>	<i>Nannochloropsis oculata</i>	Fija		X	Cerrado	17.1	31.9	Alimento de animales, fertilizantes e insecticidas	Presenta potencial para secuestro de CO ₂ y producción de biocombustibles	Se inhibe con corrientes ricas en CO ₂ , presenta baja producción de biomasa en presencia de N ₂ , también	[73], [41], [79].

										presenta una baja tasa de crecimiento a alta intensidad lumínica.	
<i>Scenedesmus</i>	<i>Scenedesmus obliquus</i>	Fija	X	X	Cerrado	0.14	0.012 -0.55	Cosméticos, fertilizantes e insecticidas	Presenta potencial para secuestro de CO ₂ y producción de biocombustibles, también alta tasa de crecimiento a bajas concentraciones de CO ₂ .	Requieren de tiempos de fase oscura muy cortos (<4hrs)	[41], [62].

Nota. Este cuadro muestra las principales familias de microalgas y algunas especies de las mismas con algunas de sus principales características y atributos con el fin de compararlas entre sí y escoger las mejores.

Figura 29.*Cuadro de criterios de microalgas*

MICROALGAS			
Criterios	Porqué	Cantidad de artículos	Artículos
% Fijación del CO ₂	Permite conocer la productividad de los microorganismos y, por ende, un buen funcionamiento del proceso	12	[99], [110], [78], [71], [70], [3], [111], [75], [67], [62], [108], [112].
Velocidad del alimento	Este criterio es de suma importancia, ya que permite realizar los balances de masa y energía, capacidad de los microorganismos, permitiendo así mismo determinar el diseño del biorreactor.	8	[113], [111], [109], [75], [67], [108], [110], [112].
Producción de biomasa anual	Este criterio determina si el microorganismo es óptimo para la conversión de los contaminantes a tratar, además argumenta el cumplimiento de los parámetros propuestos y las sustancias que inhiben el cumplimiento de las normas.	9	[113], [110], [65], [67], [62], [111], [109], [108], [112].
Composición de nutrientes y compuestos tóxicos	Al manipular microorganismos, el alimento y los nutrientes son de vital importancia, ya que son los encargados de un	13	[113], [92], [6], [71], [3], [75], [92], [62], [114], [108], [107], [111], [70]

	óptimo crecimiento del microorganismo.		
Fotoperiodo y fotoinhibición	Nos permite conocer el tiempo que requiere el cultivo de luz y oscuridad, para así, determinar cuál sería la mejor ubicación y los tiempos requeridos de energía y la necesidad de la misma.	11	[99], [92], [78], [65], [75], [67], [62], [114], [108], [107], [112].
Intensidad lumínica	Este criterio permite determinar el diseño y localización del biorreactor, en su lugar de aplicación, así como costos de producción y la utilidad de los microorganismos.	12	[6], [110], [78], [71], [70], [65], [75], [67], [115], [62], [114], [107].
pH	Permite conocer la viabilidad del cultivo, conocer los parámetros a especificar y variar dentro del proceso	11	[113], [92], [6], [110], [78], [71], [70], [3], [115], [114], [112].

Nota. Este cuadro representa los criterios seleccionados para las microalgas según la bibliografía recopilada, puesto que se toma como una bibliometría

Figura 230.

Cuadro criterios fotobiorreactores

FOTOBIORREACTORES			
Criterios	Porqué	Cantidad de artículos	Fuente
Sistema de intercambio de gases	Este criterio permite determinar el correcto diseño del biorreactor, al tener en cuenta un sistema de	6	[60], [94], [116], [112], [11], [70].

	intercambio de gases óptimo y funcional dentro del mismo.		
Recirculación	A partir de este criterio es posible determinar variaciones en las condiciones del proceso, tanto para el biorreactor, así como para los microorganismos; además de afectar el diseño del equipo y los accesorios del mismo.	6	[91], [78],[72], [117], [35], [94].
Requerimiento energético	Este criterio permite determinar la cantidad necesaria de energía requerida para llevar a cabo un correcto funcionamiento del equipo y del proceso, teniendo en cuenta los diferentes tipos de energía a usar.	9	[55], [70], [91], [78], [92], [72], [56], [82], [94].
Intensidad lumínica	El control de este criterio permite un diseño adecuado a la función a realizar, además de elegir los materiales adecuados.	8	[116], [70], [78], [72], [60], [56], [82], [68].
Temperatura, presión y pH	Estos criterios son importantes, ya que se toman como las condiciones de funcionamiento del reactor para un proceso adecuado y satisfactorio.	9	[98], [91], [78], [92], [69], [72], [60], [117], [82].
Velocidad del alimento	Por medio de este criterio es posible determinar características fundamentales del diseño del biorreactor, como tamaño, materiales, etc.	5	[98], [78], [69], [60], [117]
Dimensionamiento	Este criterio afecta directamente al reactor y por lo tanto la productividad de los	6	[98], [91], [78], [92], [117], [82].

	microorganismos, al involucrar costos de diseño y mantenimiento; así como intensidad lumínica y temperatura.		
--	--	--	--

Nota. Cuadro de clasificación de criterios de fotobiorreactores para determinar el más adecuado a partir del método Saaty.

ANEXO 2

TABLAS DE CALCULOS Y RESULTADOS DE MATRICES

Figura 31.

Criterios de evaluación según escala thomas saaty

ESCALA NUMERICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
1	Igualmente, importante	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderadamente importante	Preferencia leve de un elemento sobre el otro
5	Fuertemente importante	Preferencia fuerte de un elemento sobre el otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Mucha más preferencia de un elemento sobre otro. Predominancia demostrada
9	Importancia extremadamente fuerte	Preferencia Clara y absoluta de un elemento sobre le otro
2,4,6,8	-	Intermedio de los valores anteriores

Nota. Escala numérica Saaty para criterios de evaluación.

Tabla 10.

Matriz de opciones de cepas en función del criterio porcentaje de fijación de carbono

Porcentaje de Fijación de Carbono								
Criterios	Chlorella	Chlorococcum	Scenodermus	Spirulina	Chlamydomonas	Dunaliella	Botrycoccum	Importancia de criterio
Chlorella	1	1/3	3	5	9	5	5	23%
Chlorococcum	3	1	5	7	9	6	7	39%
Scenedesmus	1/3	1/5	1	3	9	1/5	1	8%
Spirulina	1/5	1/7	1/3	1	9	1/7	1/3	5%
Chlamydomonas	1/9	1/9	1/9	1/9	1	1/9	1/9	2%
Dunaliella	1/5	1/6	5	7	9	1	3	16%
Botrycoccum	1/5	1/7	1	3	9	1/3	1	8%
TOTAL	5,04	2,10	15,44	26,11	55,00	12,79	17,44	

Nota. Matriz obtenida de la mejor cepa en función del porcentaje de fijación.

Tabla 11.*Matriz de opciones de cepas en función del criterio intensidad lumínica*

Intencidad Lumínica								
Criterios	Chlorella	Chlorococcum	Scenedesmus	Spirulina	Chlamydomonas	Dunaliella	Botrycoccum	Importancia de criterio
Chlorella	1	3	1	5	5	3	7	26%
Chlorococcum	1/3	1	3	1/3	7	3	7	19%
Scenedesmus	1	1/3	1	3	7	7	7	22%
Spirulina	1/5	3	1/3	1	7	7	7	19%
Chlamydomonas	1/5	1/7	1/7	1/7	1	1/7	1	3%
Dunaliella	1/3	1/3	1/7	1/7	7	1	7	9%
Botrycoccum	1/7	1/7	1/7	1/7	1	1/7	1	2%
TOTAL	3,21	7,95	5,76	9,76	35,00	21,29	37,00	

Nota. Matriz obtenida de la mejor cepa en función de la intensidad lumínica.**Tabla 12.***Matriz de opciones de cepas en función del criterio producción de biomasa*

Producción de Biomasa								
Criterios	Chlorella	Chlorococcum	Scenedesmus	Spirulina	Chlamydomonas	Dunaliella	Botrycoccum	Importancia de criterio
Chlorella	1	3	9	7	5	9	9	37%
Chlorococcum	3	1	7	7	1/3	7	9	28%
Scenedesmus	1/9	1/7	1	1/3	1/2	3	5	6%
Spirulina	1/7	1/7	1/3	1	1/5	3	7	6%
Chlamydomonas	1/5	3	2	5	1	5	7	18%
Dunaliella	1/9	1/7	1/3	1/3	1/5	1	1/5	2%
Botrycoccum	1/9	1/9	1/5	1/7	1/7	5	1	4%
TOTAL	4,68	7,54	19,87	20,81	7,38	33,00	38,20	

Nota. Matriz obtenida de la mejor cepa en función de la producción de biomasa.

Tabla 13.

Matriz de opciones de fotobiorreactores en función del criterio sistema de intercambio de gases

Sistema de Intercambio de Gases				
Criterios	Placas Planas	Tubular	Membrana	Importancia de criterio
Placas Planas	1	1/7	5	32%
Tubular	7	1	1/5	35%
Membrana	1/5	5	1	33%
TOTAL	8,20	6,14	6,20	

Nota. Matriz obtenida del mejor fotobiorreactor en función del sistema de intercambia de gases.

Tabla 14.

Matriz de opciones de fotobiorreactor en función del criterio intensidad lumínica

Intensidad Lumínica				
Criterios	Placas Planas	Tubular	Membrana	Importancia de criterio
Placas Planas	1	5	7	68%
Tubular	1/5	1	7	26%
Membrana	1/7	1/7	1	7%
TOTAL	1,34	6,14	15,00	

Nota. Matriz obtenida del mejor fotobiorreactor en función del criterio de intensidad lumínica.

Tabla 15.*Matriz de opciones de fotobiorreactor en función del criterio recirculación*

Recirculación				
Criterios	Placas Planas	Tubular	Membrana	Importancia de criterio
Placas Planas	1	1/7	1/5	7%
Tubular	7	1	7	72%
Membrana	5	1/7	1	21%
TOTAL	13,00	1,29	8,20	

Nota. Matriz obtenida del mejor fotobiorreactor en función del criterio de recirculación.**Tabla 16.***Matriz de opciones de fotobiorreactor en función del criterio dimensionamiento*

Dimensionamiento				
Criterios	Placas Planas	Tubular	Membrana	Importancia de criterio
Placas Planas	1	1/7	5	21%
Tubular	7	1	7	72%
Membrana	1/5	1/7	1	7%
TOTAL	8,20	1,29	13,00	

Nota. Matriz obtenida del mejor fotobiorreactor en función del criterio de dimensionamiento.

Tabla 17.

Cálculos del flujo inicial

			PM ₁₀ (g/km)	PM _{2.5} (g/km)	CO ₂ (g/km) (anual)	CO ₂ (g/km) (día)	CO (g/km)(anual)	CO (g/km)(día)	NO _x (g/km) (anual)	NO _x (g/km) (día)	SO ₂ (g/km) (anual)	SO ₂ (g/km) (día)	VOC (g/km)(anual)	VOC (g/km)(día)	TOTAL (Anual en g/km)	Total día en g/km
Biarticulado	Euro IV	Diesel	0,047	0,043	1,13480579	0,00315	0,01292003	3,5889E-05	0,01247906	3,4664E-05	2,0564E-05	5,7121E-08	0,00096649	2,6847E-06	1,25441478	0,003226
	Euro V		0,047	0,043	0,36785834	0,00102	0,006	1,5389E-05	0,01247906	3,4664E-05	1,904E-05	5,289E-08	4,4174E-05	1,227E-07	0,47701253	0,001
						0,002087		2,56E-05		0,00003466		5,50E-08		1,40E-06		0,00215

Combustible consumido	
km/Gal consumido de Diesel	km/Gal consumido de Diesel Promedio
5,8	6,15
6,5	

Densidad CO ₂ (g/L)	Densidad CO (g/L)	Densidad NO _x (g/L)	Densidad SO ₂ (g/L)	Densidad VOC (g/L)	# Biarticulados	1 Galón = Litro
0,91	0,579	1,58	0,651	----	1313	3,785

Velocidad del gas * Combustible consumido (Gas producido/ Gal consumido de Diesel)				
CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	VOC
0,013	0,000158	0,0002131	0,00000033	0,0000086

Conversión a litro (g Gas producido/ Litros consumido de Diesel)				
CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	VOC
0,003391085	4,1659E-05	5,6323E-05	8,93749E-08	2,28078E-06

Concentración en %V/V (L gas producido/L consumido)				
CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	VOC
0,373%	0,0072%	0,00356%	0,00001%	---

Flujo de alimento (L/km*h)					
CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	VOC	Total
0,055042642	1,06E-03	0,00052654	2,03E-06	-----	0,05663397

Nota. Cálculos iniciales para balance de masa y flujo inicial teniendo en cuenta los índices tomados por el Ministerio de ambiente.

Figura 32.

Suposiciones matematicas cálculo de flujo

$$\begin{aligned}
 \text{Velocidad Gas } \left(\frac{gX}{km \text{ recorrido}} \right) * \text{Combustible consumido} &= \frac{km \text{ recorrido}}{Gal \text{ Diesel consumido}} = \frac{g \text{ Gas}}{Gal \text{ Diesel consumido}} \\
 \text{Conversión Gal} \rightarrow \text{Litros} &= \frac{g \text{ Gas}}{Gal \text{ Diesel consumido}} * \frac{1 \text{ Gal}}{3,785 \text{ L}} = \frac{g \text{ Gas}}{L \text{ Diesel consumido}} \\
 \text{Concentración \% V/V} &= \frac{g \text{ Gas}}{L \text{ Diesel Consumidos}} * \frac{1}{\frac{g \text{ Gas}}{L \text{ gas}}} = \frac{g \text{ Gas}}{L \text{ Diesel consumidos}} * \frac{L}{g} = \frac{L \text{ Gas producido}}{L \text{ diesel consumido}} * 100 \\
 \text{Flujo inicial} &= \frac{g \text{ Gas} * \text{Dia}}{km \text{ recorridos}} * \frac{1}{\rho \text{ Gas}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ Dia}} = \frac{L \text{ Gas} * h}{km \text{ recorridos}} * \frac{1}{h} = \frac{L \text{ Gas}}{km \text{ recorridos} * h} \\
 \text{Volumen del reactor CSTR } \tau &= \frac{V}{v} \rightarrow V = \tau * v
 \end{aligned}$$

Nota. Relaciones y suposiciones matemáticas tomadas para llevar a cabo los cálculos anteriores

Tabla 18.*Balance de masa*

BALANCE DE MASA										
ENTRADA						SALIDA				
	F1	[%v/v]1	[]*F1	F4	[]*F4	[%v/v]7	[]* F7	[%v/v]5	[]*F5	F6
Gases emitidos	CO2	0,373%	0,05504264	Agua	0,0169902	0,186%	5,276E-05	0,19%	5,3E-05	Agua
	CO	0,0072%	0,00106275			0,0036%	1,019E-06	0,004%	1,0E-06	
	NO2	0,00356%	0,00052654			0,0018%	5,047E-07	0,002%	5,0E-07	
	SO2	0,00001%	2,0279E-06			0,00001%	1,9438E-09	0,000%	0	
Flujo Inicial 1	0,056634			0,0169902			0,02831698		0,02831698	0,0169902
X	0,5									

Nota. Balance de masa inicial según los cálculos y suposiciones hechos a lo largo del proyecto

Tabla 19.*Cinética de la reacción y volumen del reactor*

Volumen del fotobiorreactor CSTR

Conversión	0,5
F. Volumétrico (v)	0,0566
F. Masico (F)	0,1042572

Densidad a 30°C [g/L]	1,842
-----------------------	-------

Constantes cinéticas [s-1] a 25-30°C		
0,037	59	4000
Constantes cinéticas [h-1] a 25-30°C		
1,02778E-05	0,01638889	1,11111111

Volumen del CSTR [L]		
5979,399595	3,74979297	0,05530945

Nota. Volumen y cinética de la reacción para llevar a cabo la simulación según los cálculos y suposiciones hechos a lo largo del proyecto

ANEXO 3

FLUJOGRAMAS DE DECISIÓN

Figura 33.

Flujograma de desición de microalgas

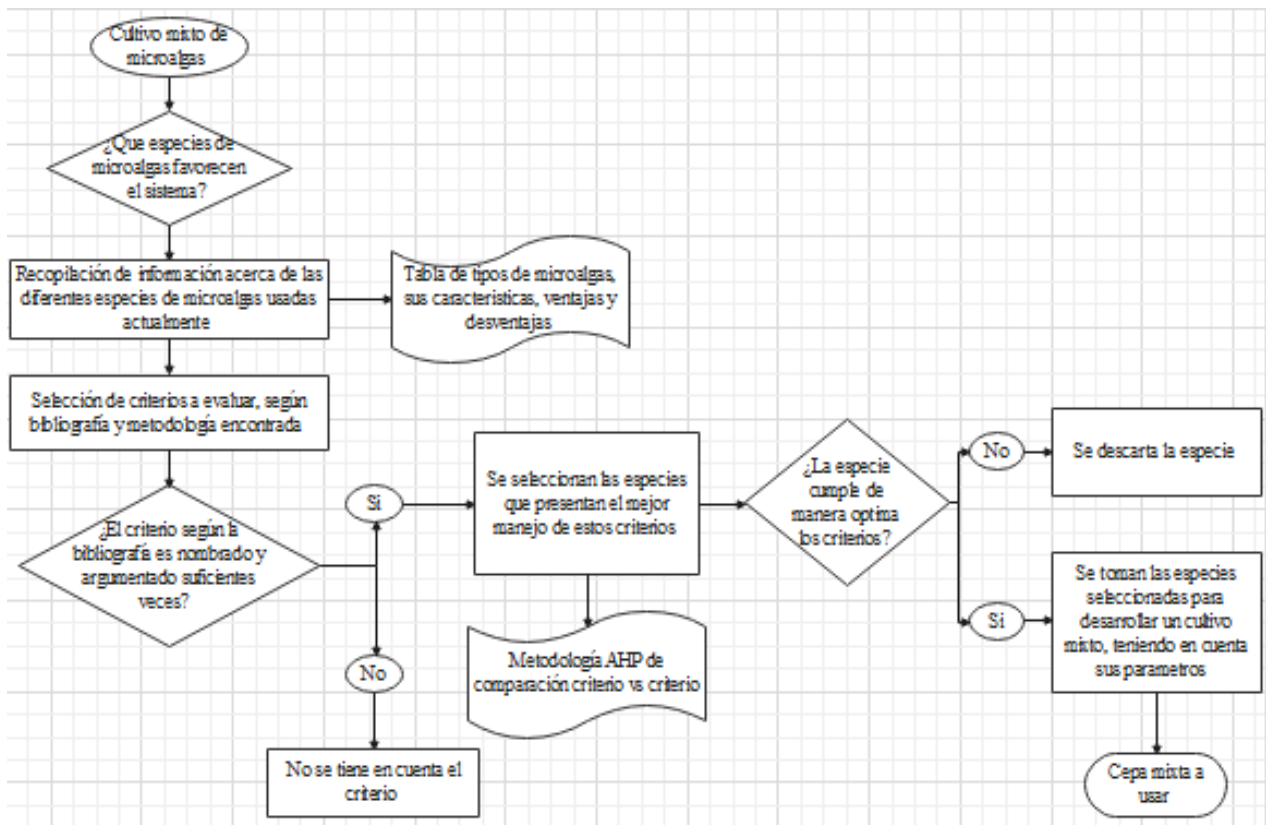


Figura 34.

Flujograma de decisión de ubicación

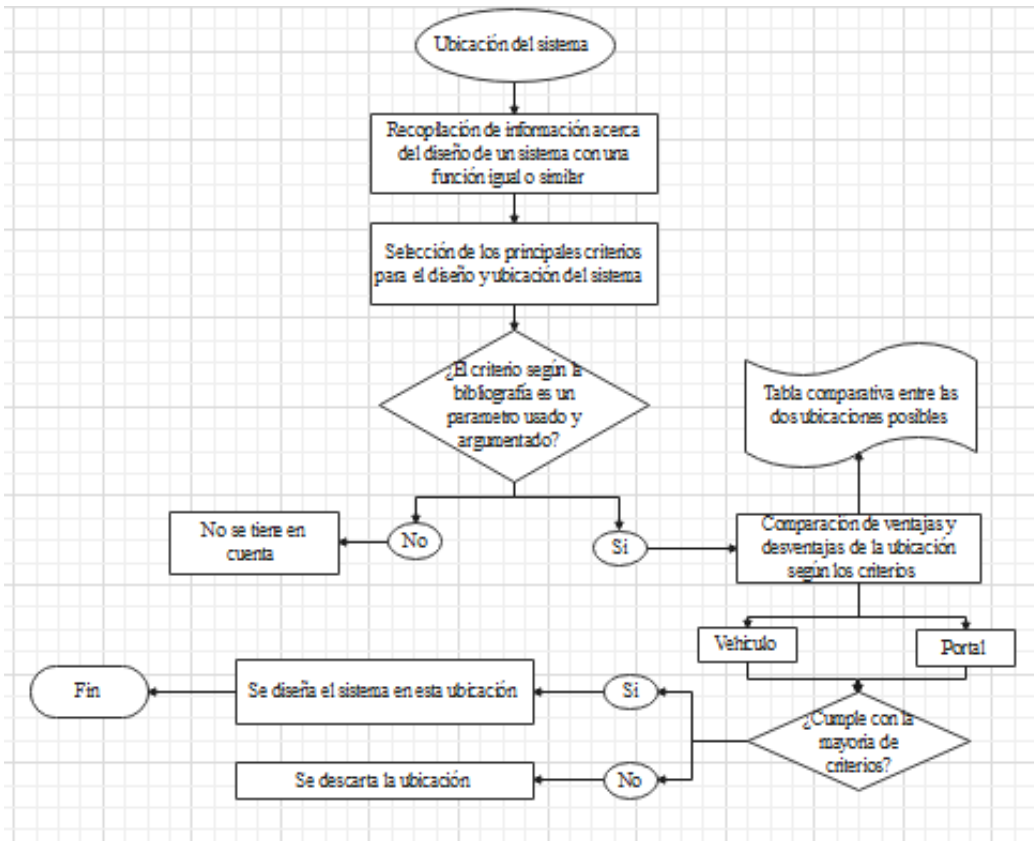
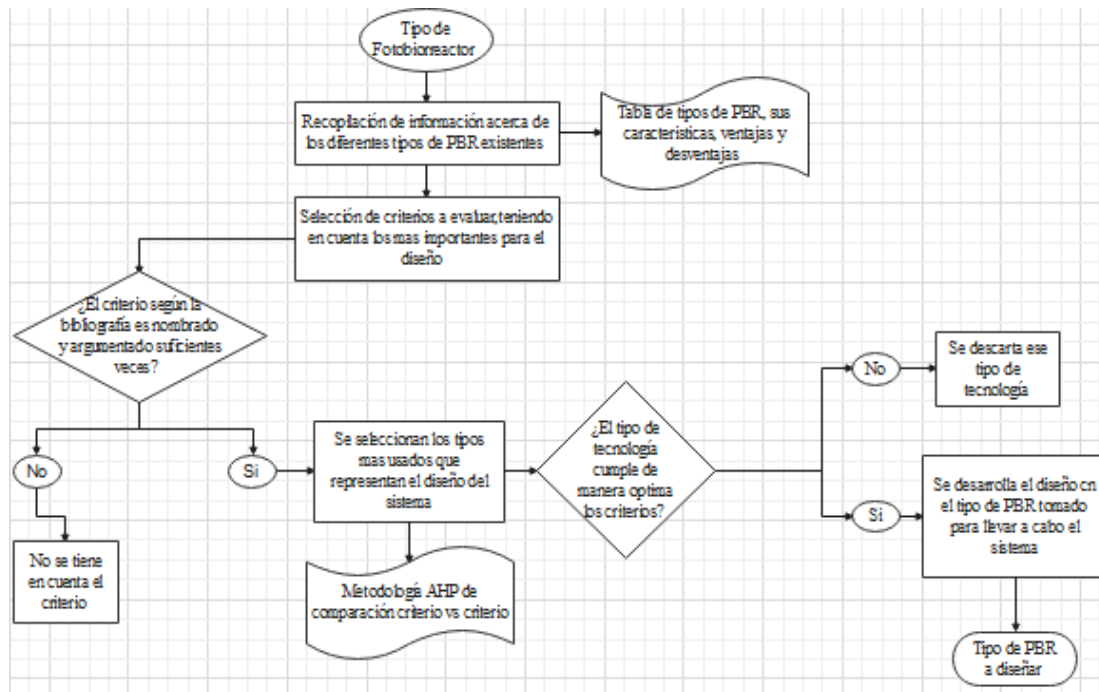


Figura 35.

Flujograma de decisión de FBR



Nota. Flujogramas de decisión para llevar a cabo una ruta de decisiones lógicas y ordenada en cada punto del proyecto.

ANEXO 4

RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuros análisis de esta índole, desarrollar un experimento a escala laboratorio, que permita observar tanto el comportamiento, crecimiento y adaptación del cultivo mixto propuesto en el presente documento. así como la caracterización precisa de la corriente de gases contaminantes a depurar; puesto que como se evidencio en este documento, la inconsistencia y falta de información precisa en estas características, crean un vacío que conlleva a suposiciones y variaciones altamente influyentes en la evaluación del proyecto.

Se plantea el uso de un software de acceso libre y no versiones demostrativas, como el caso del software usado SuperPro Designer V10, ya que esto limita el análisis profundo y conciso del proceso a evaluar; a causa de que estas versiones no permiten el uso libre de las herramientas de su plataforma, obligando al investigador a realizar modificaciones no previstas en el diseño propuesto.

Se recomienda al mismo tiempo, desarrollar un sistema dinámico que refleje el comportamiento real del proceso, puesto que en una primera vista del proyecto se tomaron suposiciones fuertes e ideales para lograr realizar el diseño, mientras que en un segundo momento se podría realizar análisis a mayor profundidad (balances másicos y energéticos).

En el proceso de enfriamiento se recomienda usar otro fluido frio que no sea aire, dado que el proceso requiere una trasferencia de calor bastante compleja debido a que se requiere generar un cambio brusco de temperatura en la corriente de gases emitidos, de manera que el uso de aire puede no cumplir con la temperatura deseado, de igual forma la exposición del aire caliente al atmósfera implica una descomposición del mismo llegando a generar bajas cantidades de ozono troposférico que crearía más complicaciones en el cambio climático.

Pese a la dificultad que requiere el proceso de separación de microalgas y los altos costos de producción que conlleva su ejecución, se recomienda una investigación adicional, la cual se enfoque únicamente en las técnicas o proceso desarrollados para la separación y purificación de biomasa y así poder determinar mejor la composición del producto obtenido.

Gracias al desarrollo logrado en este proyecto, se evidencia que la propuesta no es viable en un primer momento, por lo que se recomienda plantear alternativas de procesos de depuración de tipo ex-situ; Como la implementación del diseño en estaciones principales (de alto flujo de vehículos) del Sistema de Transporte Masivo de Bogotá (Transmilenio), los cuales permitan la depuración los gases mediante la recolección de los mismos en un tanque pequeño (caja negra) implementado en la salida del tubo de escape o exhosto, disminuyendo peso y costos finales de diseño en los articulados.