

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE BIOFIJACIÓN DE CO₂ DE UN CULTIVO
DE MICROALGAS EN UN PROCESO DE COMBUSTIÓN FIJA**

**DANIELA DÍAZ MOJICA
LIZ MARÍA GUERRERO GALINDO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE BIOFIJACIÓN DE CO₂ DE UN CULTIVO
DE MICROALGAS EN UN PROCESO DE COMBUSTIÓN FIJA**

**DANIELA DÍAZ MOJICA
LIZ MARÍA GUERRERO GALINDO**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

**Director:
JUAN DANIEL VALDERRAMA RINCÓN
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

Nota de aceptación

Microbióloga industrial
Diana Morales Fonseca

Ingeniero químico
Felipe Correa Mahecha

Bogotá D.C, febrero, 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. MARIO POSADA GARCIA PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA

Vicerrectora Académica y de Posgrados (e).

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingenierías.

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química.

Ing. LEONARDO DE JESUS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados, calificadores y el cuerpo de docentes no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIAS

A Dios por acompañarme en todo momento, por permitirme vivir experiencias tan lindas y conocer a personas maravillosas.

A mis padres Ana Mojica y Javier Díaz, por el esfuerzo que hacen a diario, por el amor y cuidado que me demuestran aún en la distancia. A mi purry hermosa, mi hermana Valentina Díaz, por ser mi mayor ejemplo, por el apoyo que me brindó en mi pregrado y a lo largo de mi vida, por su amor incondicional, compañía y consejos.

Daniela Díaz.

A la Tatis, mi ángel, por ser el mejor modelo de ser humano que me pudo regalar la vida, por enseñarme que la perseverancia, constancia y amor son las claves para alcanzarlo todo. Porque nada te hubiese llenado más de orgullo y felicidad que verme llegar hasta aquí y cumplir uno de mis sueños, eres mi inspiración, mi fortaleza y esto es por ti,

A mi madre hermosa Marleny Galindo, porque cada triunfo y logro en mi vida son tuyos.

Liz Guerrero.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios por hacer su voluntad en mí, por permitirme aprender con esta experiencia enriquecedora, por abrir caminos cada día en mi vida, por su amor y misericordia.

A mi hermosa familia, que estuvo pendiente siempre de mí y se alegran por mis triunfos. No los cambiaría por nada.

A mi compañera Liz, por ser un gran apoyo durante este tiempo de investigación, de aprendizaje, de carreras. Gracias por tu entrega y comprensión.

Al grupo GRESIA por la acogida que nos brindaron en su laboratorio, por el conocimiento brindado para el desarrollo de este proyecto. A nuestro director del proyecto, Juan Valderrama, por su disposición, paciencia y guía.

Daniela Díaz.

Gracias infinitas a mis padres, pues nada de esto habría sido posible sin su apoyo y amor incondicional, por todo el esfuerzo que hacen a diario para sacarme adelante, por ser cómplices de mis sueños, así no los aprueben del todo. Son mi definición de amor y el motor de mi vida.

A Dios, por permitirme llegar hasta aquí, por las bendiciones que me brindó a lo largo de este camino, por hacerme entender que su tiempo es perfecto y por las personas tan maravillosas que puso en mi vida.

A mis amigos: Jose Rincón, Juan Vallejo, Lessy Sánchez, Andrés Gaitán, Luisa Rodríguez, Nazhda Habib, Diana Rodríguez, Andrés Echavarría, Ebby Rincón y Banesa Torres, porque el camino no fue fácil, pero ustedes hicieron todo más bonito, gracias por apasionarse con mis ideas, por sus consejos, sus regaños, por de una u otra forma vivir esto conmigo. Fueron los protagonistas de la mejor etapa de mi vida y les agradezco cada momento. “Bendigo el día y el lugar donde los conocí”^{5a}

A Dani, por su apoyo, por todo lo que vivimos y superamos juntas, gracias por lucharla hasta el final. Fue hermoso compartir esto contigo.

Finalmente, al grupo GRESIA, a los profesores y compañeros que nos guiaron durante este proyecto; por abrirnos sus puertas y por la increíble forma en la que logran transmitir todo su conocimiento, gracias por creer en esta idea y brindarnos los medios y conocimientos para materializarla, los admiro profundamente y fue un honor hacer parte de este equipo.

Liz Guerrero.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	21
1. GENERALIDADES	22
1.1 MARCO CONCEPTUAL	22
1.2 CAMBIO CLIMÁTICO	24
1.2.1 Gases de efecto invernadero (GEI)	25
1.2.2 Clasificación de las fuentes fijas	26
1.2.3 Fuentes móviles	26
1.3 PROCESO DE COMBUSTIÓN	27
1.3.1 Reacción de la combustión	27
1.3.2 Fases de la reacción de combustión.	29
1.3.3 Tipos de combustión	29
1.4 TIPOS DE COMBUSTIBLES	30
1.4.1 Combustibles sólidos	31
1.4.2 Combustibles líquidos	32
1.4.3 Combustibles gaseosos	32
1.5 MICROALGAS	33
1.5.1 Parámetros de cultivo	34
1.5.2 Biofijación del carbono	37
1.5.3 Sistemas de cultivo	40
1.5.4 Inyección del CO ₂ en el cultivo	42
2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN	46
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN	46
2.2 SELECCIÓN DEL COMBUSTIBLE	47
2.2.1 Carbón	48
2.2.2 Madera	49
2.2.3 Cascarilla de arroz	52
2.2.4 Matriz de selección para el combustible sólido	56
2.3 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN	59
2.4 ALMACENAMIENTO DEL GAS DE COMBUSTIÓN	61
2.4.1 Pruebas de permeabilidad	63
2.5 ANÁLISIS DEL SISTEMA	64
2.5.1 Flujo de la emisión	64
2.5.2 Cuantificación del CO ₂ en la emisión	65
2.5.3 Eficiencia de combustión	69
3. CULTIVO DE MICROALGAS EN EL FOTOBIORREACTOR	74

3.1 CEPA MICROALGAL	74
3.2 MEDIO DE CULTIVO	75
3.3. EQUIPOS UTILIZADOS PARA EL CRECIMIENTO DEL CULTIVO	77
3.4 MÉTODOS DE ESTRIADO EMPLEADOS	79
3.5. INOCULACIÓN EN EL FOTOBIORREACTOR	81
3.5 CONSTRUCCIÓN DEL FOTOBIORREACTOR	82
3.5.1 Materiales y dimensionamiento	83
3.5.2 Sistema de seguimiento óptico	84
3.5.3 Sistema de agitación	88
3.6 CONSTRUCCIÓN DE LA INCUBADORA	90
3.6.1 Iluminación	91
3.6.2 Temperatura y ventilación	92
3.6.3 Velocidad de agitación	92
3.6.4 Densidad celular	94
3.7 ENTREGABLE FINAL DEL SISTEMA	96
4. EVALUACIÓN DEL GRADO DE BIOFIJACIÓN EN EL CULTIVO	97
4.1 CRECIMIENTO DE LAS MICROALGAS	97
4.1.1 Conteo celular	97
4.1.2 Curvas de crecimiento	101
4.2 pH DEL MEDIO	102
4.3 BIOFIJACIÓN DE CO ₂	104
4.3.1 Porcentaje (%) de biofijación	106
4.3.2 Relación de carbono en cada fase	107
5. CONCLUSIONES	109
6. RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFÍA	111
ANEXOS	119

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tiempo de vida de los G.E.I directos	25
Tabla 2. Características combustibles de algunos metales	31
Tabla 3. Tasa de biofijación de CO ₂ de algunas especies	34
Tabla 4. Composición de la biomasa de la cascarilla de arroz	52
Tabla 5. Datos teóricos de Cascarilla por combustión completa	70
Tabla 6. Datos de la ceniza producida en el reactor, luego de ser llevada a la mufla	71
Tabla 7. Composición de la orina humana	76
Tabla 8. Velocidad máxima de crecimiento celular a distintos volúmenes de inyección de gas de combustión	101
Tabla 9. Influencia del pH en el crecimiento celular	103
Tabla 10. Biofijación de CO ₂ a partir de la productividad de biomasa seca para las distintas inyecciones del gas de combustión	107
Tabla 13. Mediciones de la intensidad lumínica de la incubadora	122

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Curvas de calibración de los sensores	95
Gráfica 2. Curva de crecimiento con relación al número de células	99
Gráfica 3. Linealización de la velocidad de crecimiento	100
Gráfica 4. Curva de crecimiento de las microalgas con diferentes inyecciones de CO ₂	102
Gráfica 5. Curva de calibración peso seco	105
Gráfica 6. Biomasa obtenida con cada inyección	105
Gráfica 7. Curva de calibración de los sensores	123

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Triángulo del fuego	28
Figura 2. Tipos de agitadores	37
Figura 3. Ciclo de Calvin-Benson	39
Figura 4. Solubilidad de CO ₂ en agua pura y salmuera (0.5 molal)	44
Figura 5. Porcentaje de carbono fijado en biomasa en un flujo de flujo 1VVM	45
Figura 6. Escala de las emisiones contaminantes generadas en la cocina por diferentes tipos de combustible (1,0 en escala)	51
Figura 7. Dimensiones y partes del reactor de combustión	60
Figura 8. Montaje necesario para el almacenamiento del gas de combustión	61
Figura 9. Contenedor de los gases de combustión	62
Figura 10. Ausencia de burbujas tras la prueba	63
Figura 11. Interacción del CO ₂ con NaOH	67
Figura 12. Ceniza obtenida tras la combustión en el reactor	71
Figura 13. Aislamiento por agotamiento	80
Figura 14. Rayado masivo	81
Figura 15. Etapas en la producción de algas	82
Figura 16. Recipiente empleado para el FBR	84
Figura 17. Sistema de muestreo de densidad óptica	85
Figura 18. Sensor fotoeléctrico utilizado	85
Figura 19. Sistema de inyección	86
Figura 20. Sistema de seguimiento óptico e inyección del gas en el FBR	87
Figura 21. Sistema de agitación diseñado	88
Figura 22. Geometrías empleadas para los agitadores	89
Figura 23. Incubadora	91
Figura 24. Ubicación del cordón de resistencia, ventilación e iluminación en la incubadora	93
Figura 25. Diseño del panel de control	93
Figura 26. Conteo en zigzag	98
Figura 27. Cuadrícula de recuento celular	98
Figura 28. Bomba empleada para el almacenamiento del gas	120
Figura 29. Sello de caucho para la extracción del gas de combustión	120
Figura 30. Reactor de combustión	120
Figura 31. Prueba con anilina para demostrar la capacidad del impulsor	121
Figura 32. Fotobiorreactores construidos	124
Figura 33. Interior de la incubadora	124
Figura 34. Incubadora vista pre-lateral	125
Figura 35. Incubadora y programa para evaluar el crecimiento celular por absorbancias	125

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Reacción de combustión de C e H	28
Ecuación 2. Reacción de la fotosíntesis	38
Ecuación 3. Reacción del CO ₂ en la fase líquida del cultivo	42
Ecuación 4. Carbón inorgánico presente en la microalga	43
Ecuación 5. Reacción balanceada y general de combustión de la cascarilla	53
Ecuación 6. Flujo de emisión del sistema	65
Ecuación 7. Reacción de absorción de CO ₂ con NaOH	66
Ecuación 8. Presión hidrostática	68
Ecuación 9. Ecuación de estado de gas ideal	68
Ecuación 10. Cálculo de las moles de CO ₂ en 40mL de gas de combustión de cascarilla	68
Ecuación 11. Porcentaje de humedad en la muestra	72
Ecuación 12. Cálculos necesarios para determinar la eficiencia del reactor	73
Ecuación 13. Cálculos de la eficiencia del reactor de combustión	73
Ecuación 14. Ecuación de la recta	95
Ecuación 15. Cálculo del número de células	99
Ecuación 16. Velocidad máxima de crecimiento celular	101
Ecuación 17. Biofijación de CO ₂ a partir de productividad de biomasa seca	106

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Montaje del reactor de combustión	120
Anexo B. Prueba de agitación en el FBR	121
Anexo C. Intensidad lumínica de la incubadora	122
Anexo D. Curva de calibración usando agua destilada como blanco	123
Anexo E. Montaje de los fotobiorreactores y de la incubadora	124
Anexo F. Diagrama de flujo de la metodología	126

ABREVIATURAS

ATP: adenosina trifosfato.
CO₂: dióxido de carbono.
CO₂-eq: masa de CO₂ equivalente.
cm: centímetro.
FBR: fotobiorreactor.
g: gramos.
GEI: gases de efecto invernadero.
GLP: gas licuado del petróleo.
Ha: hectárea.
L: litro.
LPM: litros por minuto.
MCC: mecanismo de concentración del carbono.
mL: mililitro.
mm: milímetro.
NADPH: nicotiamida adenina dinucleótido fosfato.
PP: polipropileno
PCG: potencial de calentamiento global.
PGA: ácido poliglicólico.
P_H: presión hidrostática.
ppm: partículas por millón.
R: constante universal de los gases [atm L/ml K]
rpm: revoluciones por minuto.
RuBisCO: ribulosa-1,5-bifosfato-carboxilasa/oxigenasa.
Tm: tonelada métrica.
TEP: tonelada equivalente de petróleo.

GLOSARIO

ABSORBANCIA: medida que cuantifica la cantidad de luz que logra atravesar un cuerpo, cuando un haz de luz incide sobre este.

ALICUOTA: porción que se toma de un volumen inicial para realizar una prueba de laboratorio, pues su composición y propiedades físico-químicas representan a la de la sustancia original.

AUTÓTROFO: organismo capaz de sintetizar su alimento a partir de sustancias inorgánicas.

BIOFIJACIÓN: proceso biológico realizado por los organismos, mediante el cual el CO₂ es absorbido y transformado en material orgánico o biomasa a través del Ciclo de Calvin-Benson o asimilación del carbono.

BIOMASA: cantidad de materia obtenida mediante la fotosíntesis, susceptible de ser transformada y aprovechada por el hombre, se expresa en unidades de superficie y volumen.

CAROTENOS: pigmentos tetra terpenos de color rojo, naranja o amarillo, presentes en diversas estructuras de plantas, animales, algas, hongos y bacterias.

CLORANFENICOL: antibiótico de amplio espectro, altamente efectivo para la prevención y tratamiento de bacterias grampositivas, gramnegativas y microorganismos anaerobios.

COMBUSTIBLE: todo material que, al ser sometido a una reacción de oxidación, es capaz de generar energía en forma de calor, la cual se debe a la combustión completa de un kilogramo de combustible, llamado también: poder calorífico [J/Kg].

DEFLAGRACIÓN: combustión que se produce con gran rapidez, ocasionando que una sustancia arda de manera súbita, con llama, pero sin explosión, como los fósforos, los cuales causan una deflagración cuando alcanzan su temperatura de ignición al frotar su cabeza sobre una superficie.

DETONACIÓN: es una combustión rápida y violenta que ocurre después del encendido generado por la chispa, debido a dos o más frentes de llama, que chocan entre sí, originando una fuerte onda expansiva.

ESPECTROFOTOMETRÍA: método científico usado para medir la cantidad de luz que absorbe un medio o sustancia, a través de la medición de la intensidad con la que un haz de luz logra atravesar el medio.

FERTILIZANTES: es cualquier tipo de sustancia orgánica o inorgánica que contiene nutrientes como N, P, K en formas asimilables para el aprovechamiento de las plantas.

FICOBILINAS: pigmentos azules y rojos presentes en las cianobacterias y en ciertas algas que les permiten capturar la energía lumínica para traspasarla a la clorofila durante la fotosíntesis.

FITORREMEDIACIÓN: técnica que aprovecha la capacidad de algunas plantas para absorber, acumular y metabolizar los contaminantes presentes en suelo, aire, agua o sedimento.

FOTOBIOREACTORES: dispositivos cerrados utilizados para la producción masiva de microorganismos fotosintéticos. Durante su funcionamiento se deben controlar las condiciones de temperatura, concentración de CO₂, intensidad lumínica, entre otros.

FOTORRESISTENCIA: o fotorresistor, componente electrónico que responde al cambio de la intensidad de la luz. El valor de su resistencia es inversamente proporcional a la cantidad de luz incidente.

FOTOSÍNTESIS: proceso metabólico realizado por organismos autótrofos, consiste en la transformación de un sustrato inorgánico en materia orgánica aprovechable, gracias a la energía lumínica que se traduce en energía química, necesaria para este proceso.

FOTÓTROFO: organismo con la capacidad de utilizar los fotones de la luz como fuente de energía.

FUGAS: orificios que pueden presentarse en forma de grietas, fisuras, hendiduras, etc., mediante los cuales algún fluido retenido puede recluirse o escaparse.

HERMETICIDAD: característica que permite que un elemento sea impenetrable, impermeable y completamente cerrado.

INOCULAR: en microbiología, hace referencia a la acción de implantar un organismo o bacteria en un medio específico con la finalidad de desarrollarse y reproducirse.

INTRACITOPLASMÁTICO: que se halla en el interior del citoplasma.

MICROALGAS: microorganismos unicelulares, fotoautótrofos que generan biomasa orgánica y O₂ a partir de CO₂ y luz; poseen una gran capacidad ficorremediadora la cual consiste en la eliminación de contaminantes de un medio mediante la captación debida a su biomasa algal.

MITIGACIÓN: cualquier tipo de actividades o estrategias, cuyo fin sea la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para evitar los efectos adversos del calentamiento global.

PERMEABILIDAD: capacidad de un material para posibilitar que un fluido lo penetre sin producir cambios en su estructura interior. Por lo tanto, un material será impermeable si la cantidad de fluido que deja pasar a través de él es despreciable.

RESUMEN

En la actualidad, la principal problemática ambiental es la masiva emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, siendo el CO₂, el gas presente en mayores proporciones. A raíz de esto, han aumentado los estudios para encontrar una alternativa que contrarreste dicho problema, como es el caso de las microalgas, microorganismos fotosintéticos que han demostrado una capacidad elevada para capturar los contaminantes de carbono presentes en distintos medios, con el fin de aprovechar este carbono inorgánico para llevar a cabo sus procesos metabólicos y producir compuestos orgánicos de alto valor nutricional, biomasa y oxígeno.

Esta capacidad de captación ya ha sido verificada para el suministro de CO₂ puro, arrojando resultados satisfactorios. Pero teniendo en cuenta las implicaciones que genera este gas al producirse masivamente en cada proceso de combustión, el presente proyecto plantea evaluar la capacidad de las microalgas para capturar el CO₂ procedente de un proceso de combustión real. Para esto, se construyó un sistema que consiste en un gasificador tipo cohete, en el cual se utilizó cascarilla de arroz como combustible con el fin de darle un aprovechamiento a este residuo y generar el gas de combustión necesario para suministrarle a tres fotobiorreactores un volumen conocido de este gas, para de este modo determinar el volumen que genera un mayor crecimiento del cultivo y biofijación de CO₂ por parte de las microalgas

Para esto se desarrollaron tres pruebas, en las que se evaluó el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* bajo diferentes volúmenes de inyección del gas de combustión, los cuales fueron de 20, 30 y 50 mL de este gas, presentando un mejor crecimiento con la primera inyección, la cual contiene 0.000757 moles de CO₂, que al ser capturado, generan una biofijación de 0,254 g/L*d. Esta cifra se traduce en la producción de 0,335g de biomasa por cada litro de cultivo, hecho que demuestra la capacidad de biofijación de CO₂ por parte de estos microorganismos aún bajo la presencia de los demás gases generados en un proceso de combustión fija.

PALABRAS CLAVE: microalgas, biofijación, dióxido de carbono, combustión, crecimiento celular.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, como consecuencia de la masiva emisión de gases de efecto invernadero, es la principal amenaza del siglo XXI. Pues desde la era industrial se han emitido una gran cantidad de estos gases de combustión, hasta alcanzar en la actualidad un total de 415.7 partículas por millón de CO₂ en la atmósfera¹ cifra que supone la mayor cantidad de gases de efecto invernadero emitidos en la historia de la humanidad.

Para mitigar esta problemática surgen iniciativas encaminadas a la inclusión de políticas -a largo plazo- de crecimiento verde y sostenible, uso de energías alternativas y tecnologías que aumenten la eficiencia en la combustión, pero ninguna de ellas basa su estudio en la reducción de las emisiones de CO₂ presentes en la atmósfera, ni en el tratamiento de las que se generan cada día en el país. Y teniendo en cuenta que actualmente en el país no existe una prueba concepto que demuestre cuantitativamente el grado de absorción de CO₂ que pueden alcanzar las microalgas al someterlas a las emisiones generadas en un proceso de combustión real, en el cual la pureza de sus componentes es variable y desconocida.

El presente proyecto planteará una alternativa a escala laboratorio para evaluar la capacidad ficorremediadora que han demostrado estos microorganismos para absorber eficientemente el CO₂, en estudios realizados por diversos grupos de investigación y como es el caso del grupo GRESIA^(*), el cual aprovecha características tales como su velocidad de crecimiento y fácil adaptación, para desarrollar alternativas orientadas a la generación de procesos limpios, y el cual será el sustento científico/experimental para la realización de éste.

¹ CO₂.EARTH. Daily CO₂. Máximos históricos de todos los tiempos. ProOxygen. [en línea]. Colombia: 2019. [Consultado: 30 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://es.co2.earth/daily-co2>

(*) El Grupo de Investigación en Recursos, Ecología, Desarrollo Sostenible e Ingeniería Ambiental (GRESIA) de la universidad Antonio Nariño, está enfocado en la formulación y desarrollo de proyectos de bio-remediación de aguas, aire y suelos, aprovechamiento de residuos para prevenir o mitigar problemas ambientales o como fuentes alternativas de energía.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de biofijación de CO₂ de un cultivo de microalgas en un proceso de combustión fija.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Definir las especificaciones técnicas del sistema de combustión para su construcción e implementación.
2. Obtener el cultivo de microalgas con los parámetros adecuados para su crecimiento y adaptación en el fotobiorreactor.
3. Determinar el grado de biofijación de CO₂ alcanzado por las microalgas.

1. GENERALIDADES

1.1 MARCO CONCEPTUAL

1.1.1 Acuerdo de París. Es un tratado internacional adoptado en 2015 durante la COP21 que busca reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, evitando el incremento de la temperatura media global (>2°C) y promoviendo esfuerzos adicionales para que el calentamiento global no supere los 1,5°C. Por medio de una revisión cada 5 años de los compromisos que han adquirido todos los países pertenecientes a este.²

1.1.2 Conferencia de las partes (COP). Es el máximo órgano decisorio de la convención, conformado por aquellos países que la han ratificado; se lleva a cabo anualmente en el país que se ofrece como sede.³

1.1.3 Contaminantes atmosféricos. Una sustancia atmosférica es considerada contaminante cuando su concentración supera el nivel permitido (natural), durante periodos lo suficientemente largos como para afectar la salud y el bienestar humano, los ecosistemas y el patrimonio.⁴

1.1.4 Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Es el tratado internacional firmado en la Cumbre de Río de 1992 que busca darle solución al problema del cambio climático a través de "la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el clima".⁵

1.1.5 Gases de Efecto Invernadero (GEI). Son compuestos que están presentes en la atmósfera, en pequeñas cantidades (gases traza) que debido a su capacidad para absorber y remitir radiación infrarroja puede aumentar significativamente la temperatura de la atmósfera baja.⁶

² IDEAM. Comunicación nacional de cambio climático. PNUD. [en línea]. Colombia: 2012. [Consultado: 22 de abril de 2019]. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/02_3421/cartilla_INGEI.pdf

³ Ibíd.

⁴ Ibíd.

⁵ Ibíd.

⁶ Ibíd.

1.1.6 Ciclo de Calvin-Benson. Ruta metabólica cíclica, conocida como la “fase oscura de la fotosíntesis”, consiste en una serie de reacciones químicas que se producen en el estroma de los cloroplastos para poder realizar la fijación del carbono presente en el CO₂, con la finalidad de formar la glucosa que permite regenerar las moléculas necesarias para continuar con el ciclo.⁷

1.1.7 Huella de carbono. Cantidad de emisiones de GEI, que produce el ser humano al realizar sus actividades diarias, se define como la huella que deja nuestro paso por el mundo expresadas en toneladas de CO₂ emitidas.⁸

1.1.8 Inventario nacional de emisiones de GEI. Es la cuantificación de las emisiones de GEI emitidos a la atmósfera por fuentes antropogénicas (resultado de actividades humanas) durante un periodo específico de tiempo, con el fin de determinar las principales actividades emisoras de GEI y las cantidades asociadas a estas.⁹

1.1.9 Contaminación antropogénica. El término antropogénico se refiere a los efectos, procesos o materiales que surgen como resultado de actividades humanas. En cuanto a la contaminación las principales fuentes antropogénicas son: la producción de energía y actividades industriales, la agricultura, minería, transporte, construcción, entre otras.¹⁰

1.1.10 Contaminantes primarios. Son sustancias o productos químicos emitidos directamente a la atmósfera por medio de los fenómenos naturales, como tormentas de polvo o emisiones volcánicas, y los que resultan de la actividad humana como: combustión en vehículos, chimeneas de las fábricas, evaporación de solventes, etc.¹¹

1.1.11 Calor de combustión. Es un término atribuido al calor que es liberado cuando el combustible se quema o cuando los componentes principales reaccionan

⁷ BRICEÑO, Gabriela. Ciclo de Calvin. Euston [en línea]. s.f. [Consultado: 22 de abril de 2019]. Disponible en: <https://www.euston96.com/ciclo-de-calvin/>

⁸ SOSTENIBILIDAD. Claves para entender la huella de carbono. [en línea]. 2018. [Consultado: 22 de abril de 2019]. Disponible en: <https://www.sostenibilidad.com/cambio-climatico/claves-para-entender-la-huella-de-carbono/>

⁹ *Ibíd.*

¹⁰ ECHARRI, Luis. Ciencias de la tierra y del medio ambiente. Tema 8. [en línea]. s.f. [Consultado: 30 agosto de 2019]. Disponible en: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoescuela/recursosdigitales/2014/11/10/libro-electronico-de-ciencias-de-la-tierra-y-del-medio-ambiente/>

¹¹ *Ibíd.*

con el oxígeno. En este proceso ocurre una disminución en la entalpía del cuerpo a una temperatura conocida y a condiciones normales de presión.¹²

1.1.12 Protocolo de Kioto. Tratado firmado en 1997 que tiene como objetivo la reducción de GEI, asignando a los países desarrollados metas de reducción de al menos 5% de sus emisiones de GEI tanto específicas como globales.¹³

1.1.13 Punto de ignición. Es la temperatura necesaria para preservar la llama generada en la combustión, su temperatura es de 20 a 60°C superior a la temperatura de inflamación.¹⁴

1.2 CAMBIO CLIMÁTICO

En la actualidad el cambio climático es innegablemente la mayor problemática del siglo XXI, era que sufre las consecuencias de eventos tales como la revolución industrial, la expansión de la agricultura y la finalización de la segunda guerra mundial, desde la cual se han emitido grandes cantidades de CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y otros gases de efecto invernadero a tasas mayores de las que la biósfera y los océanos pueden asimilar, generando el efecto invernadero o calentamiento global. Problemática que consiste en la captura de la radiación infrarroja de la atmósfera baja ocasionando un aumento en la temperatura de la tierra, pues una vez en la atmósfera, los GEI actúan como el vidrio en un invernadero: absorben la energía y el calor que irradia el sol desde la superficie de la tierra, impidiendo que escape al espacio, provocando el calentamiento de la superficie de la tierra.

¹² *Ibíd.*

¹³ GARCIA, ARBELAEZ, C. El acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático. 1° ed. [en línea]. Cali. 2016. [Consultado: 22 abril 2019]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/el_acuerdo_de_paris_frente_a_cambio_climatico.pdf

¹⁴ IDEAM. Resolución 0062 de 2007. [en línea]. s.f. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/51310/56882/Parte_2_Resolucion_0062_de_2007.pdf/007d7059-15fd-47a5-bc60-2109e77a7208

1.2.1 Gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases son compuestos presentes en la atmósfera en cantidades traza, que, debido a su capacidad para absorber y emitir radiación infrarroja, generan un aumento en la temperatura de la atmósfera de la tierra. Aproximadamente $\frac{3}{4}$ partes del efecto invernadero natural se debe al vapor de agua¹⁵, pero en lo relacionado al efecto generado por las emisiones antropogénicas, los GEI que más contribuyen a esta problemática se dividen en directos e indirectos, de acuerdo su tiempo de vida. En el caso de los GEI directos, son considerados de larga vida, y su duración en la atmósfera se especifica en la siguiente tabla:

Tabla 1. Tiempo de vida de los G.E.I directos

Gas	Tiempo de vida
CO ₂	>100 años
CH ₄	12 años
Clorofluorocarbonos (CFC's)	45 - 1020 años

Fuente: Elaboración propia con base en IDEAM. Comunicación nacional de cambio climático. PNUD. [en línea]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/>

Los GEI indirectos son el Ozono (O₃), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxidos de azufre SO₂, entre otros gases cuyo tiempo de vida es mínimo en comparación con los GEI directos.

Por otra parte, el metano es uno de los principales gases de efecto invernadero debido a su gran potencial de calentamiento global (PCG), el cual expresa la cantidad de radiación infrarroja que puede atrapar un GEI en la atmósfera, y que según el panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC): 1kg de CH₄ atrapa 21 veces más radiación infrarroja que 1 kg de CO₂, por lo que climáticamente 1 kgCH₄ equivale a 21 kgCO₂. Es decir, que su efecto negativo sobre el calentamiento del planeta es 21 veces mayor que el del dióxido de carbono y es por esta razón que los inventarios de gases de efecto invernadero convierten las emisiones de todos estos gases a masa de CO₂ equivalente (CO₂-eq).¹⁶

Teniendo en cuenta el tiempo de vida del CO₂ en la atmósfera y las severas emisiones generadas en distintas fuentes, de las cuales destacan las fuentes naturales que, debido a fenómenos naturales como incendios o erupciones volcánicas pueden liberar grandes cantidades de CO₂ al medio ambiente y las

¹⁵ IDEAM. Comunicación nacional de cambio climático. PNUD. [en línea]. Colombia: 2012. [Consultado: 22 de abril de 2019]. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf

¹⁶ Ibid.

fuentes antropogénicas que son el principal problema en la actualidad y de las cuales podemos distinguir dos grandes tipos: las fuentes fijas y las móviles, las cuales se describen a continuación.

1.2.2 Clasificación de las fuentes fijas.

- **Fuentes puntuales:** derivadas de la combustión necesaria para la generación de energía eléctrica, vapor y de actividades industriales, estas dependen de la calidad de los combustibles, la eficiencia de los quemadores, el mantenimiento del equipo y de la presencia de controladores al final del proceso. Los principales contaminantes asociados a este tipo de fuente son sustancias como: SO₂, NO_x, CO₂, CO e hidrocarburos.
- **Fuentes de área:** incluyen la generación de emisiones inherentes a actividades como: el tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo y rellenos sanitarios, también incluye las emisiones de procesos como el consumo de solventes, limpieza de superficies y equipos, entre otros. En este tipo de emisión se encuentra un gran número de contaminantes.
- **Fuentes naturales:** se refiere a las emisiones producidas por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos, denominas emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la tropósfera al participar directamente en la formación de ozono. Los contaminantes emitidos en esta son partículas de NO_x, CO₂, CO, SO₂, e hidrocarburos no metanogénicos.¹⁷

1.2.3 Fuentes móviles. Estas incluyen las emisiones generadas por los aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses, equipo y maquinarias no fijas con motores de combustión y similares, que por su operación puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera, emitiendo de esta forma compuestos orgánicos volátiles, CO, CO₂, SO₂, y NO_x, producidos durante la combustión.¹⁸

En lo referente a las fuentes antropogénicas, cabe resaltar la importancia de la capacidad de absorción del CO₂ en nuestro planeta, la cual se lleva a cabo fundamentalmente por especies fotosintéticas, por lo que actividades como la

¹⁷ INECC. Tipos de contaminantes atmosféricos. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. [en línea]. México. 2007. [Consultado: 22 de agosto de 2019]. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>

¹⁸ Ibíd.

deforestación son muy perjudiciales en este sentido, pues la tala indiscriminada de ecosistemas para la construcción de urbes que satisfagan nuestros requerimientos, ocasiona una mayor explotación de los recursos y por ende una mayor acumulación de gases en la atmósfera.

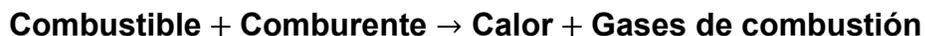
Partiendo de las anteriores premisas y teniendo en cuenta que las fuentes fijas de combustión son las que emiten mayores cantidades de CO₂ y por ende generan un mayor crecimiento y biofijación por parte de las microalgas, se analizará el fenómeno de la combustión desde su definición misma, hasta su transformación para generar energía.

1.3 PROCESO DE COMBUSTIÓN

La combustión es un proceso fisicoquímico de oxidación, que surge de una reacción química en la que se libera una gran cantidad de calor; esta reacción exotérmica es auto mantenida por un proceso de conducción de calor y difusión de especies.

La quema de un material combustible eleva su entropía, aumentando consecuentemente su tendencia a reaccionar, convirtiendo a este proceso en uno de los más importantes en la actualidad, ya que la mayor parte de la producción mundial de energía se da por la combustión de petróleo, carbón y gas natural.

1.3.1 Reacción de la combustión. El proceso de combustión se da a partir de una reacción altamente exotérmica de oxigenación, en la cual, el combustible debe alcanzar su temperatura de ignición. En este proceso tanto el combustible, como comburente (elemento que aporta el oxígeno necesario al combustible para dar lugar a la reacción de oxigenación) reaccionan, generando calor y gases de combustión.¹⁹



Esta reacción puede resumirse en tres procesos principales:

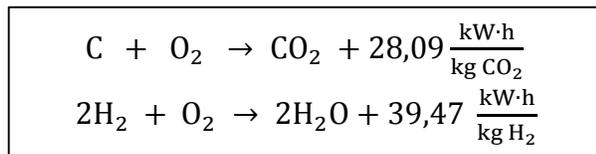
- Descomposición del combustible para reaccionar con el oxígeno formando compuestos inestables.

¹⁹ MARTINEZ, Isidoro. Proceso de combustión: Características. En: Termodinámica básica y aplicada. España: editorial DOSSAT, S.A. s.f. ISBN: 84-237-0810-1. p.357-361.

- Fase de oxidación, en la cual ocurre la mayor liberación de energía en forma de calor.
- Oxidación completa, fase en la que se producen los componentes estables de la combustión.

La reacción de combustión de los elementos fundamentales (C, H) con la energía que desprenden, es:

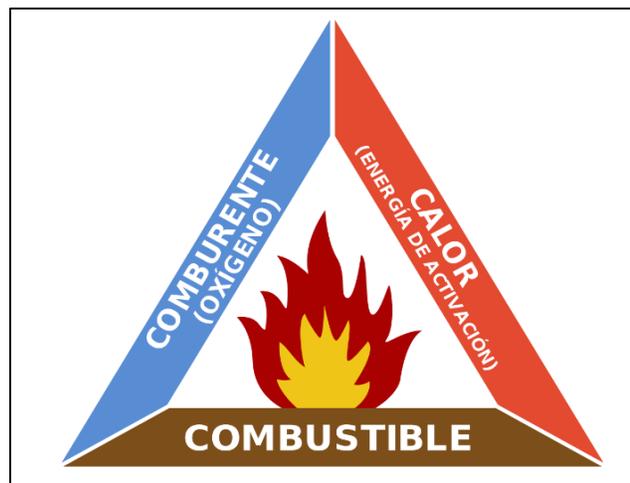
Ecuación 1. Reacción de combustión de C e H



Fuente: GARCIA, Ricardo. Combustión y Combustibles. Teoría de la combustión. Pág 3. Trabajo de grado de Maestría. 2001.

Teniendo en cuenta lo anterior, los tres elementos necesarios para que se produzca esta reacción y que componen el triángulo del fuego, son:

Figura 1. Triángulo del fuego



Fuente: AELAF. Triángulo del fuego [en línea]. [Consultado: 30 de agosto de 2019]. Disponible en: <http://www.aelaf.es/el-triangulo-del-fuego/>

El combustible es una sustancia que cambia su estructura química y libera parte de su energía en forma de calor cuando arde, está compuesto tanto por elementos

combustibles como carbono, hidrógeno y azufre (C, H, S) y otros no combustibles, como níquel, sodio, silicio (Ni, Na, Si), entre otros.

El comburente, también llamado agente oxidante, es el componente encargado de oxidar el combustible, provocando su combustión. El comburente por excelencia es el oxígeno, por lo que suele utilizarse aire para suplir sus necesidades ya que su composición es de 21% oxígeno (O₂) y 79% nitrógeno (N₂), proporción suficiente para lograr la combustión, la cual puede darse incluso a concentraciones de 10-15% de oxígeno.²⁰

La energía de activación es la energía mínima requerida para iniciar la reacción de combustión, ocurrida después de una colisión entre las moléculas de los componentes.²¹ Cabe resaltar que, durante este proceso, ningún cuerpo se quema en cuanto a su masa o volumen, lo que arde son los vapores desprendidos al alcanzar su temperatura de ignición.

1.3.2 Fases de la reacción de combustión.

- **Pre-reacción:** en esta fase los compuestos hidrocarbonados se disocian, de manera que, tanto carbono como hidrógeno puedan formar compuestos intermedios altamente activos e inestables al reaccionar con el oxígeno.
- **Oxidación:** es una fase altamente exotérmica, ocurrida tras la reacción del combustible con el comburente, en la cual se genera la propagación de la llama.
- **Terminación:** en esta fase se da la formación de los productos estables de la reacción, denominados gases de combustión.²²

1.3.3 Tipos de combustión. De acuerdo con el tipo de material del cual esté compuesto el combustible y a las características con las que se realice la combustión, como la cantidad de oxígeno dispuesta, esta reacción se puede clasificar en:

- **Combustión neutra o estequiométrica.** Es aquella generada cuando el comburente utilizado aporta la cantidad de oxígeno necesaria para transformar

²⁰ GARCIA, Ricardo. Combustión y Combustibles. Teoría de la combustión. Trabajo de grado de Maestría. p.3. 2001.

²¹ Ibíd.

²² GONZALEZ. Op. Cit, p.1.

todos los reactivos en productos, en este caso serán solamente: CO₂, H₂O y SO₂ (si interviene el azufre en la reacción). En esta reacción se deben considerar todos los elementos que interactúan en la oxidación del combustible, de tal forma que al reaccionar no haya trazas de C, H, O, y S que puedan transformarse en productos no deseados. Tampoco se generarán restos inquemados, disociados, ni oxidante sobrante.

- **Combustión incompleta.** Es aquella, en la cual, las cantidades de oxígeno están por debajo de las requeridas para generar la oxidación total del carbono y en cuyos gases de combustión se encontrarán compuestos que no se han quemado totalmente -o que lo están parcialmente- como: CO, H₂ y en forma sólida como hollín, compuestos que pueden resultar altamente tóxicos.
- **Combustión completa.** En este tipo de combustión, se debe aportar un exceso de oxígeno que supere la cantidad estequiométricamente necesaria para que todos los elementos de la combustión reaccionen y se oxiden. Esta reacción dará como productos: CO₂, H₂O y material inerte sobrante y como indicativo de este tipo de combustión la ceniza generada será completamente blanca.²³

1.4 TIPOS DE COMBUSTIBLES

Los combustibles son generalmente de origen orgánico y su capacidad calorífica depende de la proporción de carbono e hidrógeno en su estructura química.²⁴ Sus propiedades más importantes son: la entalpía estándar de reacción (poder calorífico), la entalpía de vaporización (es apropiada que sea baja), la densidad, viscosidad, la composición (contenido de impurezas), la presión de vapor (la cual conviene que sea alta) y sus límites de ignición, autoinflamación y extinción. En el caso de ser transportado y almacenado, es importante conocer su coeficiente de dilatación. Igualmente, algunas propiedades dependen del estado en el que se encuentra el combustible, pues encontramos: combustibles sólidos, líquidos y gaseosos que pueden ser naturales y artificiales.²⁵

²³ *Ibíd.*, p.3.

²⁴ AMBIENTUM. La combustión como proceso de transformación energética. Enciclopedia mediambiental. s.f. [en línea]. [Consultado el 3, febrero, 2020]. Disponible en: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/la_combustion.asp

²⁵ ESPARZA, Felix. Tipos de combustibles. En: Combustibles, sólidos, líquidos y gaseosos. Bomberos de Navarra. s.f. p.26.

1.4.1 Combustibles sólidos. Estos tipos de carburantes se caracterizan por su forma sólida y su generación de cenizas tras el proceso de combustión. Su combustión depende de: el contenido de humedad del sólido, la granulometría, el contenido de cenizas, la temperatura de ignición, la conductibilidad calorífica, el grado de combustión y velocidad de propagación y se clasifican en:

- **Naturales.** Los combustibles sólidos más conocidos según su potencial calorífico son: el carbón y la madera. Su punto de ignición es de 230°C aproximadamente y depende de: sus dimensiones, forma del sólido, densidad, humedad, naturaleza del foco de calor, velocidad de calentamiento y suministro del aire. Entre los combustibles secundarios encontramos: la biomasa residual (bagazo de caña, cascarilla de arroz), coque (destilado de la hulla), y carbón vegetal (turba, destilado de madera).
- **Metales.** Todos los metales pueden actuar como combustibles de acuerdo con determinadas condiciones como: estado de disgregación, temperatura, comburente, calores de ignición, entre otras. Entre las principales características de los metales resaltan su gran conductividad térmica y eléctrica, y su temperatura específica de fusión. Algunos de estos no necesitan la presencia de oxígeno y pueden llegar a reaccionar en atmósferas de N₂, CO₂ y vapor de agua y pueden dividirse entre pesados y ligeros.²⁶

Tabla 2. Características combustibles de algunos metales

Metal	Características
Magnesio	Muy inflamable. Puede generar autoignición al estar húmedo.
Aluminio	Sólo arde en láminas o virutas. Durante su combustión, descompone el agua.
Metales alcalinos (Na, K, Li)	Rápida oxidación en presencia de humedad. Pueden explotar al entrar en contacto con el agua

Fuente: elaboración propia, con base en: ESPARZA, Felix. Tipos de combustibles. En: Combustibles, sólidos, líquidos y gaseosos. Bomberos de Navarra. s.f. p.29.

- **Plásticos.** Son materiales que contienen en su estructura una sustancia orgánica de alto peso molecular. Su grado de combustión depende de la

²⁶ *Ibíd.*, p.29.

estructura y de los aditivos que constituyen al polímero y en este proceso pueden generar un gran volumen de humos densos y gases tóxicos. Entre sus propiedades resaltan su baja conductividad y densidad, su elevada propagación de la llama y su punto de ignición por debajo de los 350°C. ²⁷

1.4.2 Combustibles líquidos. Son aquellos componentes cuyo punto de inflamación es de 37°C aproximadamente. Debido a que, el que arde es el vapor, la velocidad de combustión y su propagación dependerán de: la energía de activación, la presión de vapor, índice de evaporación y punto de inflamación y ebullición.

Entre los combustibles líquidos primarios se tienen: el petróleo crudo y sus derivados como la gasolina y el gasóleo, y en los secundarios se encuentran los alcoholes (destilados de la biomasa) aceites de nafta y la bencina (destilados del petróleo). Todos estos se caracterizan por su poder calorífico, volatilidad, viscosidad, densidad específica, contenido de azufre, punto de inflamación y punto de congelación. ²⁸

1.4.3 Combustibles gaseosos. Son aquellos gases capaces de arder bajo concentraciones normales de oxígeno en el aire. En la actualidad son los combustibles más utilizados, debido a su fácil transporte, almacenamiento y su mayor poder calorífico, en relación con los combustibles sólidos y líquidos. ²⁹

Estos se pueden clasificar según sus propiedades físicas como: comprimidos, licuados y criogénicos, y según su origen en puros (verdaderos), e industriales, (subproductos); los más utilizados son: gas natural, gases licuados del petróleo (GLP), mezcla de metano, etano, propano y butano, el acetileno y el hidrógeno. Entre los combustibles gaseosos secundarios resaltan: los destilados de la madera, de la hulla, de las naftas y los destilados del petróleo. ³⁰

Teniendo en cuenta las implicaciones que requiere el proceso de combustión y el tipo de combustible empleado, para el presente proyecto se realizará el montaje de un reactor de combustión en el que se generen las emisiones de CO₂ necesarias para que se produzca el mayor crecimiento de las microalgas.

²⁷ *Ibíd.*, p.28.

²⁸ *Ibíd.*, p.31.

²⁹ *Ibíd.*, p.32.

³⁰ MARTINEZ. Op. Cit, p.3.

1.5 MICROALGAS

Son microorganismos unicelulares fotoautótrofos, capaces de producir su alimento a partir de sustancias inorgánicas como CO₂ y iones bicarbonato, acumulándolo en la célula como un depósito de carbono inorgánico para el proceso de fotosíntesis.³¹

Durante este proceso producen compuestos orgánicos de alto valor nutricional, biomasa y oxígeno, siendo las encargadas de generar el 70% del oxígeno del planeta, ya que al ser organismos unicelulares tienen la capacidad de realizar este proceso con mayor agilidad que las plantas.³² Es por esta razón que las microalgas representan una clara alternativa ficorremediadora, no solo para la generación de biocombustibles y tratamiento de aguas residuales, sino para la reducción las emisiones de CO₂ presentes en la atmosfera.

Entre sus ventajas resaltan:

- La ausencia de estructuras de soporte (tallos, raíces, etc.)
- Su velocidad de crecimiento y fácil adaptación.
- La capacidad de crecer en medios líquidos: lo que facilita la operación y automatización de los sistemas de producción.
- Su alto valor nutricional, pues de ellas pueden extraerse: ácidos grasos, omega 3, 6 y 9, proteínas, aminoácidos, potentes antioxidantes, aceites esenciales y vitaminas.³³
- Los bajos costos de cultivo, ya que al ser microorganismos autótrofos solo requieren de agua, luz (como fuente de energía) y CO₂ (fuente de carbono).³⁴
- Su eficiencia para la biofijación del CO₂, “la cual realizan 10 veces más rápido que una planta normal”.³⁵

³¹ FERNANDEZ, Jose. Microalgas: Definición y características. Ing de Procesos aplicada a la Biotecnología. Universidad de Almería. Sevilla 2014. [en línea]. Disponible en: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1-microalgas.html>

³² GSBS. Microalgas. Un microorganismo con gran potencial. [en línea]. 2018. [Consultado: 30 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.greenseabiosystem.com/nosotros/que-son-las-microalgas/>

³³ *Ibíd.*

³⁴ ALGAE. Suministro de investigación de algas [en línea]. s.f. [Consultado: 30 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://algaeresearchsupply.com/products/algae-culture-chlorella-vulgaris>

³⁵ SÁEZ VEGA, Alex. Microalgas para reducir emisiones de CO₂. Revista científica. 2017, ed.162, universidad EAFIT. [en línea]. [Consultado: 30 de agosto de 2019]. Disponible en: <http://www.eafit.edu.co/investigacion/revistacientifica/edicion-162/Paginas/microalgas-para-reducir-emisiones-de-co2.aspx>

1.5.1 Parámetros de cultivo. Los cultivos de microalgas permiten aprovechar sus altas tasas de crecimiento para la generación de biomasa en un tiempo relativamente corto.³⁶ El éxito de la producción del cultivo depende de una serie de parámetros descritos a continuación:

1.5.1.1 Cepa microalgal. La elección de la especie de microalga a cultivar depende de la finalidad que se le vaya a dar a la biomasa resultante. En el caso de tener fines ficorremediadores las microalgas deben cumplir con las siguientes características: alta tolerancia a la variación estacional, buena capacidad para formar agregados y alta tasa de crecimiento.

Las cepas que han sido utilizadas para la captación de CO₂ registran en la siguiente tabla de acuerdo con su tasa de biofijación:

Tabla 3. Tasa de biofijación de CO₂ de algunas especies

Especies	Tasa de biofijación (gCO₂/L*d)	Referencias
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	2	Pedraza, M y Prada, M. 2018
<i>Chlorococum sp</i>	1	Wang, B, et al. 2008
<i>Chlorella vulgaris</i>	1,8	Ho, S, et al. 2011
<i>Spirulina</i>	0,22	De Moraes, M, et al. 2007
<i>Porphyridium purpureum</i>	0,8	Fleck-Schneider, P, et al. 2007

Fuente: elaboración propia, con base en: GARCÍA, Rafael. Producción de biomasa de microalgas rica en carbohidratos acoplada a la eliminación fotosintética de CO₂. Sevilla. s.f. Tesis doctoral. [en línea]. CSIC. Disponible en: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/56164/TESIS%20DOCTORAL%20RGC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

1.5.1.2 Luz e intensidad lumínica. Es uno de los parámetros más importantes a considerar en el cultivo, pues las microalgas poseen altas concentraciones de pigmentos como: clorofila *a*, carotenoides y ficobilinas, además de contar con un sistema intracitoplasmático altamente desarrollado, ideal para realizar la fotosíntesis, ruta metabólica que depende tanto de la intensidad lumínica como de su composición espectral.³⁷

³⁶ FERNANDEZ. Op. Cit.

³⁷ GÓMEZ, Liliانا. Microalgas: aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*: 2007, Vol.19, Nro. 2, pp.3-20. ISSN: 0258-5995.

A diferencia de otros organismos fotosintéticos, las microalgas realizan la absorción de la luz espectral en regiones de 665 a 680 nm, donde la luz es mejor absorbida por la clorofila *a*, pero gracias a las ficobilinas este rango aumenta, ya que pueden absorber eficientemente la luz en regiones de 560 a 620 nm, lo que indica una alta actividad fotosintética³⁸, la cual se intensifica con el aumento de la intensidad lumínica hasta alcanzar la máxima tasa de crecimiento. “Los cultivos con mayor densidad celular (>3 g/L) son capaces de utilizar la luz incidente con mayor eficiencia que los cultivos convencionales diluidos”.³⁹

1.5.1.3 Temperatura. A pesar de que varía con cada especie, es un factor determinante en la producción algal, pues la productividad del cultivo depende de la temperatura. Si ésta se encuentra por encima de la temperatura óptima de cada especie, la fotorrespiración de las microalgas aumentará, reduciendo consecuentemente la productividad global del cultivo.⁴⁰ La temperatura óptima para la mayoría de cultivos oscila entre los 20 y 26°C, aunque dependiendo la cepa y tipo de cultivo, pueden llegar a tolerar rangos entre los 16 y 30°C, donde una temperatura inferior a 16°C puede inhibir el crecimiento celular.⁴¹

1.5.1.4 pH. Este parámetro actúa bajo la influencia de diversos factores como lo son la respiración, la producción algal, la actividad microbiana, la eficiencia en la adición de CO₂, la alcalinidad y la composición iónica del medio de cultivo. El rango de pH para la mayoría de cepas oscila entre 7 y 9, registrando un comportamiento óptimo entre 8.2 y 8.7, el cual puede controlarse con la inyección de CO₂ o con la adición de base en el medio.⁴²

1.5.1.5 Nutrientes. Los requerimientos nutricionales dependen del tipo de cepa a utilizar, pero en términos generales, además de los macronutrientes esenciales (C, H, N, P) en ocasiones necesitan micronutrientes como: hierro, manganeso, cobalto,

³⁸ JACOB, Eduardo y TEIXEIRA, Telma. Microalgae based systems for carbon dioxide sequestration and industrial biorefineries. p.136. [en línea]. Biomass IntechOpen: 2010. ISBN: 978-953-307-113-8. [Consultado: 30 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/biomass/microalgae-based-systems-for-carbon-dioxide-sequestration-and-industrial-biorefineries>

³⁹ CONTRERAS, F. [2003]. Citado por: PÉREZ Alexis y LABBÉ José. Microalgas, cultivo y beneficios *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. Chile: 2014, Vol.49, Nro. 2, pp.157-173, DOI: 10.4067 / S0718-19572014000200001

⁴⁰ *Ibíd.*

⁴¹ BENAVENTE-VALDÉS, J. R., MONTAÑEZ, J. C., AGUILAR, C. N., MÉNDEZ-ZAVALA, A., & VALDIVIA, B. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. *Revista Acta Química Mexicana*. Coahuila: 2011, Vol.4, Nro.7. pp. 1-12. Reserva: 04-2011-101709565500-102

⁴² *Ibíd.*

zinc y cobre.⁴³ Después del carbono, el nitrógeno es el nutriente más importante para el crecimiento de las microalgas, adhiriéndose como amonio (NH_4^+) o como nitrato (NO_3^-) para regular adicionalmente el contenido de lípidos de las microalgas.⁴⁴

1.5.1.6 Sistema de agitación. Es un factor de vital importancia para aumentar difusividad de las microalgas en el cultivo, mejorando la disponibilidad de la luz y evitando una posible sedimentación y muerte celular también es un factor de vital importancia para aumentar la transferencia de masa entre las fases gaseosa y acuosa del medio debida a la inyección de CO_2 .⁴⁵ Entre los principales sistemas de agitación utilizados en la actualidad sobresalen:

- Los sistemas de agitación mecánica, en los cuales encontramos hélices y turbinas (**figura 2**), ambas deben su funcionamiento al accionar de un motor y su problemática radica en la geometría de sus impulsores, la cual puede ocasionar la incrustación de los microorganismos en sus paredes, evitando la adecuada homogenización del cultivo, además un exceso en la agitación puede generar una turbulencia en el medio, desencadenando daños irreversibles en la estructura celular debido al esfuerzo de corte, afectando drásticamente la producción de metabolitos y el crecimiento celular.⁴⁶
- Los sistemas de agitación por burbujeo, estos se basan en la homogenización del cultivo con la utilización de aire o una mezcla de gases comprimidos, los cuales pueden generar finas burbujas al utilizar difusores en forma de domos, placas y discos o burbujas gruesas con difusores en forma de aireadores de corro, tubos y mangueras perforados.⁴⁷ Estos sistemas minimizan el daño en la estructura celular de los microorganismos en comparación con los sistemas de agitación mecánica, pero aun así, pueden llegarse a registrar esfuerzos cortantes debido a la formación de burbujas en el difusor, factor a considerar para evitar una posible muerte celular.⁴⁸

⁴³ GÓMEZ. Op. Cit, p.8.

⁴⁴ PÉREZ Alexis y LABBÉ José. Microalgas, cultivo y beneficios *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. Chile: 2014, Vol.49, Nro. 2, pp.157-173, DOI: 10.4067 / S0718-19572014000200001

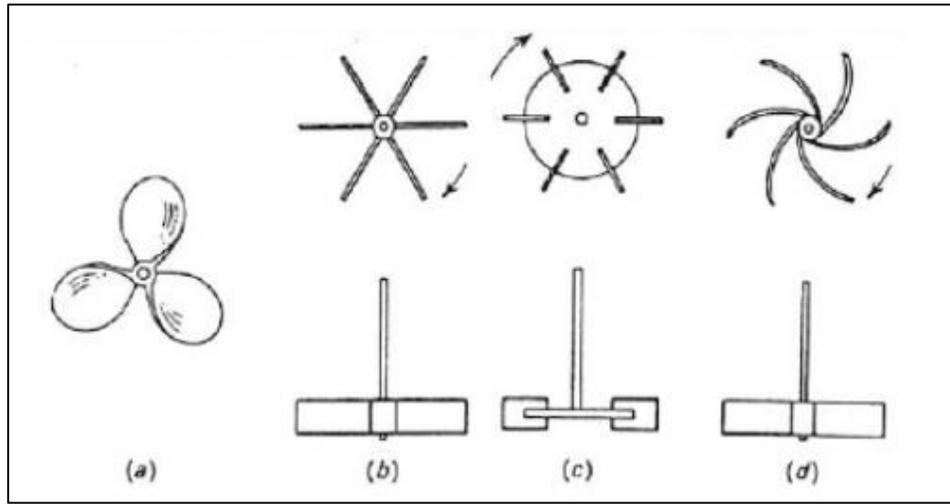
⁴⁵ *Ibíd.*, p.159.

⁴⁶ BENAVENTE-VALDÉS, MONTAÑEZ, AGUILAR, MÉNDEZ-ZAVALA & VALDIVIA. Op. Cit, p.6.

⁴⁷ FARMER, R & ARNDT R.E.A. [1995]. Citado por: DONCEL, Jennifer & MORENO, Heidy. Evaluación de la influencia de la agitación para la producción de biomasa microalgal en un FBR panel plano. Proyecto de grado. Universidad de América, Bogotá D.C: 2017

⁴⁸ BENAVENTE-VALDÉS, MONTAÑEZ, AGUILAR, MÉNDEZ-ZAVALA & VALDIVIA. Op. Cit, p.7.

Figura 2. Tipos de agitadores



(a) Helice con tres palas, (b) Turbina abierta de palas rectas, (c) Turbina de disco con palas, (d) Turbina abierta de palas curvas.

Fuente: RUBIO, Silvia & ZAMORA, Anneth. Estudio de la influencia de la geometría y el sistema de agitación sobre el comportamiento reológico de las emulsiones agua/aceite. [en línea]. Proyecto de grado. Universidad de los Andes, Bogotá D.C: 2019. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23908/u346257.pdf?sequence=1>

1.5.1.7 Adición de CO₂. Diversos estudios han demostrado la capacidad que poseen distintas especies de microalgas para la fijación de CO₂ a partir de fuentes gaseosas, la captura y almacenamiento de este por parte de las microalgas ha demostrado mejorar el crecimiento y la productividad del cultivo.⁴⁹ Por lo que esta capacidad a gran escala puede reducir las concentraciones atmosféricas de CO₂ mientras que provee adicionalmente de biomasa, materia orgánica que se traduce en energía.⁵⁰

1.5.2 Biofijación del carbono. La ruta metabólica preferida por las microalgas, es la fotosíntesis proceso en el que intervienen: el carbono inorgánico en distintas formas (CO₂, H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻) y H₂O en presencia de energía lumínica, con el fin de obtener materia orgánica (biomasa) y oxígeno como fuente de energía.

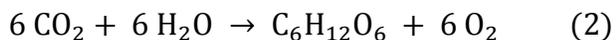
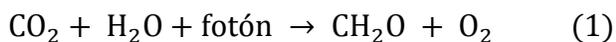
⁴⁹ *Ibíd.*, p.159

⁵⁰ GÓMEZ. Op. Cit, p.13.

El proceso fotosintético de las microalgas consiste en dos etapas: una reacción fotoquímica y una reacción de fijación de carbono.

- En la primera etapa, la energía lumínica es absorbida por los pigmentos fotosintéticos descritos previamente, con el fin de metabolizar el CO₂ a CH₂O (metanal).⁵¹ A partir de esta oxidación, el agente oxidante NADP⁺ se reduce a NADPH (nicotinamida adenina dinucleótido fosfato) liberando O₂ **(1)** y parte de la energía liberada en este proceso se incorpora al ATP en el proceso de fosforilación durante el transporte de electrones.
- La reacción de fijación del carbono el CO₂ se incorpora a la ribulosa 1,5 difosfato (rubisco). El producto de la reacción se divide en tres moléculas de carbono, ácido fosfoglicérico (PGA) y la reducción del PGA causada por el electrón transportador NADPH, metabolizándose a compuestos orgánicos como desencadenando la glucosa **(2)**.⁵²

Ecuación 2. Reacción de la fotosíntesis



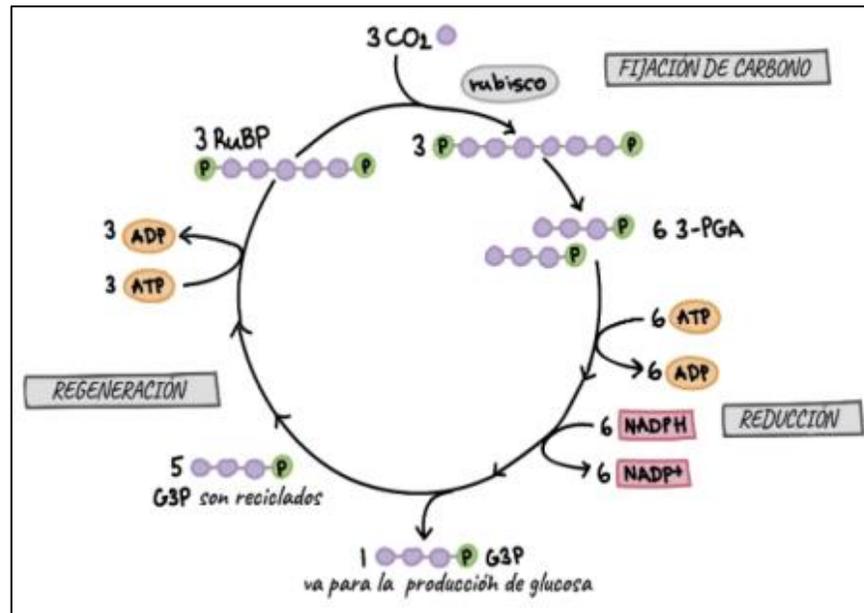
Fuente: BENAVENTE-VALDÉS, J. R., MONTAÑEZ, J. C., AGUILAR, C. N., MÉNDEZ-ZAVALA, A., & VALDIVIA, B. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. Revista Acta Química Mexicana. Coahuila: 2011, Vol.4, Nro.7. pp. 1-12. Reserva: 04-2011-101709565500-102

Esta secuencia de transformaciones metabólicas se lleva a cabo en el estroma de los cloroplastos y es conocida como el ciclo de Calvin-Benson, como se ilustra en la **figura 3**.

⁵¹ BENAVENTE-VALDÉS, MONTAÑEZ, AGUILAR, MÉNDEZ-ZAVALA & VALDIVIA. Op. Cit, p.2.

⁵² JACOB LOPES y TEIXEIRA. Op. Cit, p.137.

Figura 3. Ciclo de Calvin-Benson



Fuente: PEREZ, Octavio. Efficiency of growth and nutrient uptake from wastewater by a cultivation of *Chlorella vulgaris* immobilized with *azospirillum brasilense*. 2010. [Consultado: 30 de mayo de 2019].

Las microalgas poseen diferentes vías de asimilación de carbono, estas son:

- i. Asimilación directa del CO_2 a través de la membrana plasmática.
- ii. A partir de iones bicarbonato, que son transformados en CO_2 por acción de la enzima anhidrasa carbónica.
- iii. Transporte directo de bicarbonato a través de la membrana plasmática, en la que intervienen las enzimas anhidrasa carbónica y RuBisCO.

En el caso de las últimas vías de asimilación de carbono, la transformación del bicarbonato en CO_2 se lleva a cabo por parte de la enzima anhidrasa carbónica, capaz de elevar la concentración de CO_2 intracelular 1000 veces por encima de las concentraciones del fluido externo, lo que se traduce en una fijación eficiente de carbono. El cual es usado posteriormente como sustrato para la producción de fosfoglicerato gracias a la enzima RuBisCO.⁵³

Pese a que la carboxilación por RuBisCO es la principal vía de fijación de CO_2 de las microalgas, existen otras rutas metabólicas con las que logran la incorporación del CO_2 , como lo es la carboxilación del piruvato de fosfenol, por parte de la enzima

⁵³ *Ibíd.*, p.138.

piruvato de fosfenol carboxilasa. Sistema que funciona en paralelo con la carboxilación por RuBisCO y que le permite a las microalgas adaptarse a los cambios bruscos en su ambiente por poseer dos sistemas de carboxilación.⁵⁴

La tasa de biofijación depende de la densidad celular del cultivo, es por esto, que para optimizar el secuestro del CO₂, la inoculación de las microalgas se realiza en fotobiorreactores, en los que se controlan las condiciones de cultivo (luz, temperatura, pH, nutrientes) para evitar su contaminación y mejorar la transferencia de CO₂.

1.5.3 Sistemas de cultivo. El sistema de cultivo para el crecimiento de las microalgas es diseñado en base a diversos criterios, tales como: la biología de las especies a cultivar, los requerimientos nutricionales y lumínicos, la resistencia al estrés, la relación de la superficie iluminada/volumen del reactor, su orientación e inclinación; el sistema de mezcla y dispersión de gases, la transparencia y durabilidad de los materiales empleados, el sistema de limpieza y de regulación de la temperatura; y finalmente, los costos de construcción y operación para fines comerciales.⁵⁵

En la industria se pueden encontrar dos tipos de sistemas de cultivo: sistemas abiertos y sistemas cerrados. En los sistemas abiertos se disminuye su productividad y debido a que el cultivo está en contacto directo con la atmósfera, aumenta el riesgo de contaminación. Por otra parte, los sistemas cerrados se caracterizan por su estructura totalmente aislada de la atmósfera, la cual minimiza los riesgos de contaminación y permite un control de las condiciones para el crecimiento de las microalgas, lo que se traduce en una mayor actividad fotosintética, proporcionando una mayor productividad al cultivo.⁵⁶

En el diseño de un sistema cerrado se deben tener presentes las siguientes consideraciones, con el fin de obtener una alta producción de biomasa:⁵⁷

- La trayectoria de la luz debe ser pequeña ($\leq 2.5\text{cm}$)
- Se debe mantener una alta densidad celular ($>8-15\text{ g/L}$)

⁵⁴ *Ibíd.*, p.138

⁵⁵ PÉREZ & LABBÉ. *Op. Cit.*, p.160-161.

⁵⁶ *Ibíd.*, p.162.

⁵⁷ BENAVENTE-VALDÉS, MONTAÑEZ, AGUILAR, MÉNDEZ-ZAVALA & VALDIVIA. *Op. Cit.*, p.9.

- Evitar la inhibición del crecimiento por la acumulación de O₂ o presencia de bacterias como *Bacillus pumilus*.
- Asegurar un mezclado uniforme para: garantizar una distribución adecuada de la intensidad lumínica, aumentar la transferencia másica entre las fases del cultivo, y mantener un pH uniforme.
- Controlar las condiciones de temperatura y pH óptimos de crecimiento.

En los sistemas cerrados existen distintas tecnologías de fotobiorreactores, utilizados con el fin de mejorar la eficiencia fotosintética y lograr una mayor producción de biomasa. Los más utilizados en la actualidad son los FBR tubulares, de placa plana, y tanque agitado, descritos a continuación:

1.5.3.1 Tubulares. Son los fotobiorreactores más fáciles de escalar, pues solo requieren de un aumento en el número de tubos que lo componen, tienen distintas configuraciones, que presentan ciertas consideraciones.

En los tubulares verticales encontramos los FBR tipo airlift y columna de burbujeo, su agitación se debe a una mezcla de gases, la cual disminuye el daño celular causado por la corriente de circulación generada por sistemas de agitación que utilizan bombas, (como los FBR tubulares helicoidales). Esta agitación, provista por un rociador ubicado en la parte inferior del reactor mejora la transferencia de masa entre las distintas fases, logrando una adecuada remoción del oxígeno disuelto en el medio, a diferencia de los FBR tubulares horizontales, cuyo principal problema radica en su baja eficiencia fotosintética, debida a la acumulación de oxígeno ocasionada por la acumulación de gases.⁵⁸

1.5.3.2 Placa plana. Entre las ventajas de estos FBR resaltan su alta eficiencia fotoquímica, pues poseen una buena relación superficie/volumen (S/V) la cual depende de la capacidad que tienen para transmitir uniformemente la luz a lo largo del reactor. Su agitación puede ser mecánica o mediante burbujeo y una de sus desventajas es la falta de eficiencia al ser escalado.⁵⁹

1.5.3.3 Tanque agitado. Es el FBR más usual y económico, pues no requiere de los costos adicionales que representa la agitación por burbujeo. Pese a que han registrado una baja relación S/V, esta puede mejorar con un buen sistema de

⁵⁸ RAMÍREZ, Luis. Queiroz, L & Jacob, Eduardo. Fotobiorreactor: Herramienta para el cultivo de cianobacterias. [en línea] *Revista: Ciencia y Tecnología*: 2013, Vol.6, Nro.2, pp.9-19. ISSN 1390-4051. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4749461>

⁵⁹ *Ibíd.*, p.15.

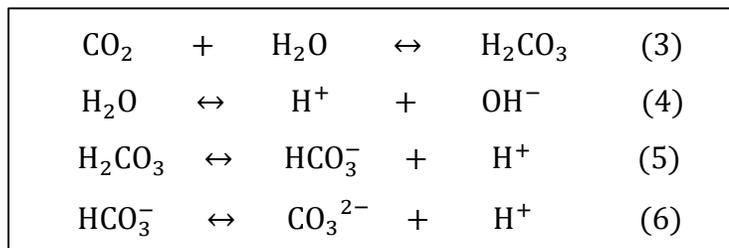
iluminación que garantice la distribución homogénea de este parámetro en todo el cultivo, así mismo su agitación mecánica puede generar la turbulencia ideal en el medio para lograr la remoción del oxígeno disuelto.⁶⁰

1.5.4 Inyección del CO₂ en el cultivo. Las microalgas se adaptan a diferentes gamas de carbono debido a un proceso biológico denominado mecanismo de concentración de carbono (MCC) cuya función radica en elevar o concentrar los niveles de carbono inorgánico intracelular en los sitios de carboxilación fotosintética, compensando las posibles limitaciones en el suministro de CO₂ que podrían reducir la tasa fotosintética convirtiendo a este gas en la principal fuente de carbono fotosintético en el cultivo de microalgas y cuya transferencia puede darse de manera continua o alterna desde la fase gaseosa a la fase líquida del medio de cultivo.⁶¹

Por la naturaleza de este gas de combustión, al ser inyectado en el fotobiorreactor ocurre un intercambio continuo de moléculas entre las fases líquida y gaseosa hasta que la fase líquida alcanza la saturación, en este punto ambas fases entran en equilibrio evitando que se produzcan más cambios en las concentraciones del gas. Dichas concentraciones dependerán directamente de la temperatura y el pH del cultivo⁶².

Las reacciones involucradas en la disolución del CO₂ en el agua son las siguientes:

Ecuación 3. Reacción del CO₂ en la fase líquida del cultivo



Fuente: VALDÉS, F. & MARCILLA, A. Estimationn of CO₂ stripping/CO₂ microalgae consumption ratios in a bubble column photobioreactor using the analysis of the pH profiles. [en línea]. *Bioresource Technology*: 2012. Nro.119. pp. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.120>

⁶⁰ *Ibíd.*, p.16.

⁶¹ JACOB LOPES y TEIXEIRA. *Op. Cit.*, p.137.

⁶² CLEMENT-LAROSIERE, Barbara. Etude de la croissance de *Chlorella vulgaris* en photobioréacteur batch et continu, en présence de concentrations élevées de CO₂. p.9. [en línea]. Autre. Ecole Centale, Paris. 2012. [Consultado: 2 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00697006/document>

La reacción (3) corresponde al equilibrio producido por la disolución del CO₂ en el agua formando H₂CO₃ (ácido carbónico), el cual se disocia casi instantáneamente en iones HCO₃⁻ (bicarbonato) y CO₃²⁻ (carbonato) (5) y (6). La reacción (4) corresponde a la disociación del agua, la cual ocurre simultáneamente con la reacción del CO₂. Y la concentración total de carbono inorgánico necesario para la fotosíntesis está dada por la suma de los productos obtenidos en cada reacción.⁶³

Ecuación 4. Carbono inorgánico presente en la microalga

$$[C_{\text{Total}}] = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

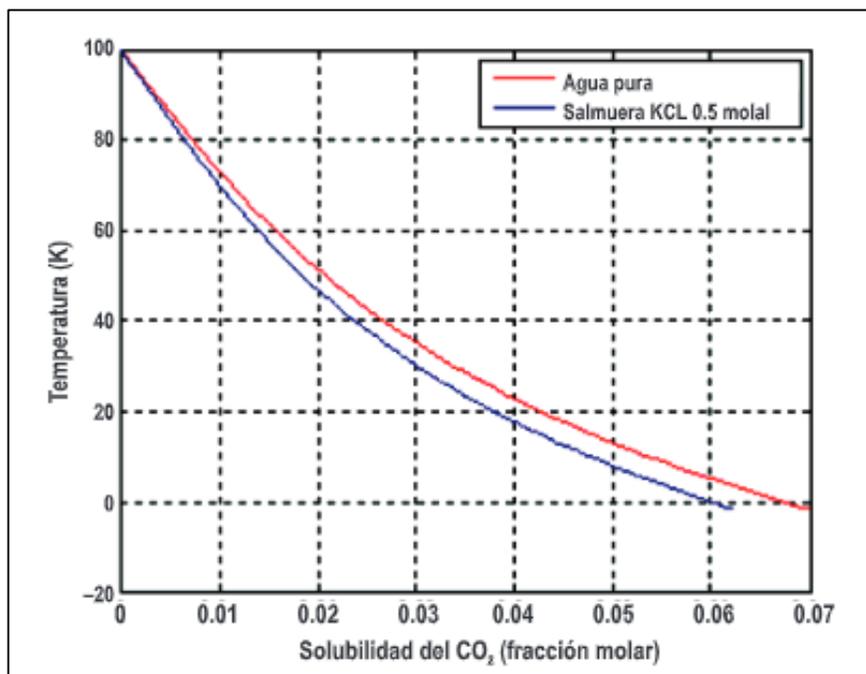
Fuente: VALDÉS, F. & MARCILLA, A. Estimationn of CO2 stripping/CO2 microalgae consumption ratios in a bubble column photobioreactor using the analysis of the pH profiles. [en línea]. *Bioresource Technology*: 2012. Nro.119. pp. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.120>

La absorción de CO₂ en el medio de cultivo depende principalmente de tres factores: el tiempo de retención del gas, la fuerza impulsora (agitación), y el coeficiente de transferencia de masa volumétrica (K_{La}). Este último depende a su vez, de factores como: la geometría del inyector del gas y de propiedades físicas del fluido como la solubilidad, que, pese a ser mucho mayor para el CO₂ que para el O₂ tal como lo indica la **figura 4**, ambos gases presentan una baja solubilidad en medios acuosos por lo que resulta necesaria una inyección continua de estos en el medio.⁶⁴

⁶³ VALDÉS, F. HERNÁNDEZ, M. & MARCILLA, A. Estimationn of CO2 stripping/CO2 microalgae consumption ratios in a bubble column photobioreactor using the analysis of the pH profiles. [en línea]. *Bioresource Technology*: 2012. Nro.119. pp. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.120>

⁶⁴ JACOB LOPES, Eduardo y TEIXEIRA Telma. Op. Cit, p.139.

Figura 4. Solubilidad de CO₂ en agua pura y salmuera (0.5 molal)

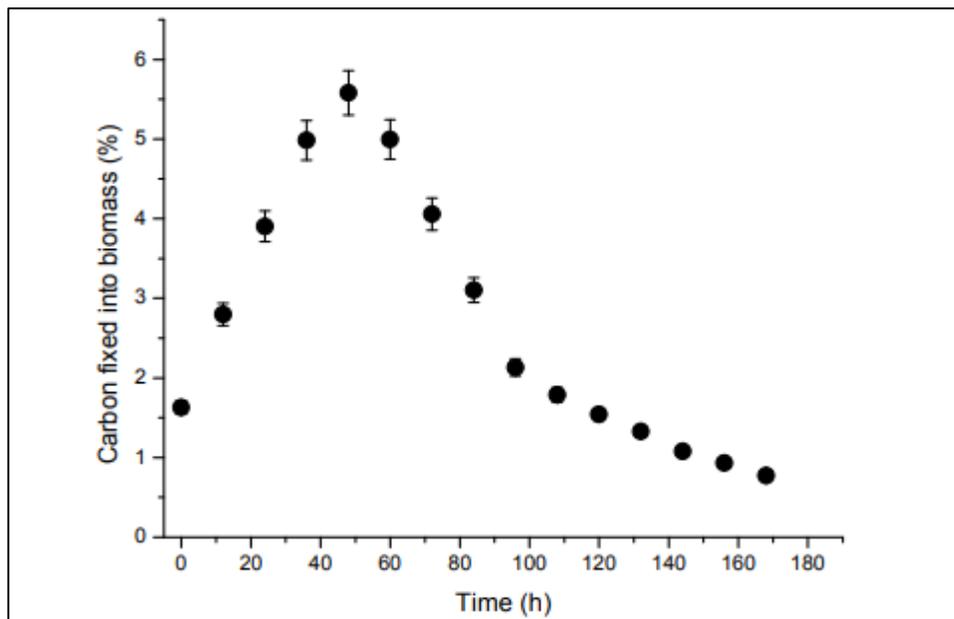


Fuente: BOTERO, Monica. CERÓN, Ivonne & CARDONA, Carlos. Cálculo de la solubilidad del CO₂ en sistemas iónicos acuosos. Avances Investigación en ingeniería: 2012, Vol.9. pp. 1-86. Disponible en: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/2738>

Finalmente, la concentración de CO₂ disuelto en el cultivo es inversamente proporcional a la temperatura y a la concentración de las sales disueltas, por lo que para aumentar estos valores son necesarios niveles más altos de saturación del medio acuoso y una temperatura más bien baja, además de un sistema de agitación que mejore la transferencia de masa entre las distintas fases. Adicionalmente, el porcentaje de carbón fijado será condicionado por el tiempo, llegando a su punto máximo durante las primeras horas, pero descendiendo drásticamente con el paso del tiempo, como se evidencia en la **figura 5**, Este factor puede llegar a ser afectado por la formación de compuestos orgánicos volátiles, así como un aumento en la acidez del medio, que se traduce en la inhibición del crecimiento celular. ⁶⁵

⁶⁵ Ibíd., p.140

Figura 5. Porcentaje de carbono fijado en biomasa en un flujo de flujo 1VVM



Fuente: JACOB LOPES, Eduardo y TEIXEIRA Telma. Microalgae-based Systems for Carbon Dioxide Sequestration and Industrial Biorefineries. [en línea]. Brasil. 2010. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/biomass/microalgae-based-systems-for-carbon-dioxide-sequestration-and-industrial-biorefineries>

2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN

Para analizar la capacidad de biofijación de las microalgas y su comportamiento frente a la inyección de CO₂ proveniente de un proceso de combustión fija fue necesaria la construcción de un reactor de combustión, para su realización y puesta en marcha se tomaron en cuenta las siguientes especificaciones:

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN

Una de las características más representativas de este proceso, es la aparición de una llama visible, la cual demuestra que la reacción se está llevando a cabo, ya que la interacción por sí sola entre el combustible y el oxidante no produce reacción alguna; para esto, es necesario una perturbación externa, que genere la chispa suficiente para iniciar la reacción.

Entre las perturbaciones que hacen arder al combustible se encuentran:

- La elevación de la temperatura al calentar uniformemente el material.
- El aporte de oxígeno, el cual puede avivar el proceso o apagarlo por barrido de especies activas o por sobre enfriamiento.
- El intercambio radiativo (*) en combustibles sólidos debido a su emisividad.

Además de otras variables que influyen en este proceso como lo son: la relación combustible/comburente, la presión, el campo de velocidades y la presencia de catalizadores: sustancias que, aunque no se consumen, controlan el progreso de la reacción.⁶⁶

La combustión de una mezcla puede darse de forma instantánea, sin propagación de llama, como en la autoinflamación, o con propagación de llama, la cual depende de la velocidad de reacción, llegando a ser una deflagración (velocidad subsónica) o una detonación (velocidad supersónica) acompañada de una onda de choque.⁶⁷

Si al producirse la llama se obtiene una gran diferencia de difusividades entre el hidrógeno y los productos de la combustión, el hidrógeno empieza a fugarse,

(*) Equilibrio que se establece entre los flujos de energía que entran y salen de un cuerpo.

⁶⁶ MARTÍNEZ. Op. Cit, p.3.

⁶⁷ BOTTA, Néstor. Dinámica de las explosiones industriales. [en línea] Red Proteger: 2015 1° Edición. ISBN 978-987-27889-9-5. Disponible en: https://www.redproteger.com.ar/editorialredproteger/serieexplosiones/30_Dinamica_Explosiones_Industriales_%201a_edicion_Diciembre2015.pdf

aumentando la concentración de las moléculas de carbono, generando una sublimación inversa la cual ocasiona la formación de núcleos sólidos, que dan paso a la aparición de hollín. Es debido a esto que, los parámetros a controlar en un proceso de combustión para que se libere toda la energía y el combustible se quemé completamente son:

- Intensidad: que libere una gran potencia por unidad de volumen del reactor.
- Estabilidad: que no se apague con las fluctuaciones normales de temperatura, presión composición, entre otros.
- Contaminación: que no produzca inquemados (CO, hollin, aldehidos), óxidos de alta temperatura como NO_x, ni óxidos de impurezas como el SO₂.⁶⁸

2.2 SELECCIÓN DEL COMBUSTIBLE

Teniendo en cuenta el triángulo del fuego y los elementos que lo componen, en lo que respecta al combustible, entre los distintos tipos mencionados previamente y sus características, se decidió utilizar un combustible sólido natural, pues además de su fácil adquisición y almacenamiento, presenta una mejor relación costo/beneficio para los requerimientos de este proyecto en comparación con los otros combustibles.

Por otro lado, se analizaron las posibles ventajas de utilizar un combustible secundario como lo es la cascarilla de arroz, en lugar de los muy conocidos combustibles primarios (carbón y madera), para determinar cuál de estos resulta ser la mejor alternativa para generar una combustión controlada que produzca los gases necesarios para suministrar al FBR. Se utilizó una matriz de selección en la que se tuvieron en cuenta factores como: la problemática presentada, la contaminación de las fuentes, los costos, entre otros.

A continuación, se darán a conocer algunos aspectos importantes sobre cada una de las opciones a utilizar como combustible sólido para el sistema de combustión fija, así como las problemáticas e impactos medioambientales y sociales que representa cada opción, para determinar cuál de ellas representa la mejor alternativa a utilizar.

⁶⁸ MARTÍNEZ. Op. Cit, p.3.

2.2.1 Carbón. Sustancia fósil resultante del proceso de descomposición de un material leñoso. Por diversas acciones químicas, variaciones de presión y temperatura a lo largo de grandes intervalos de tiempo estos vegetales se transforman en carbón en un proceso conocido como carbonización. Los cambios que dan lugar a la transformación de madera en carbón son de dos tipos: químicos y estructurales. En los procesos químicos se va desprendiendo hidrógeno y oxígeno a medida que la proporción de carbono aumenta.

Las aplicaciones más importantes del carbón son: la generación de electricidad, producción de combustibles líquidos, como combustible doméstico e industrial, como reductor en la siderurgia y como combustible en las centrales térmicas. Lo que respecta a su producción y comercialización, de acuerdo con la información reunida por Julia Symmes Cobb para Thomson Reuters, “la producción de carbón del año 2018 para Drummond rondó los 31 millones de toneladas, mientras que las exportaciones fueron de 31,6 millones de toneladas. La compañía espera producir entre 31 millones y 32 millones de toneladas este año; por otra parte, Cerrejón produjo 30,7 millones de toneladas en 2018 y exportó 30,5 millones de toneladas, y espera volúmenes similares este año”.⁶⁹

La quema de esta sustancia genera emisiones de CO₂ y la minería subterránea, gas metano (un potente gas de efecto invernadero). Su contaminación se filtra en el agua, la tierra, a través de grietas y hendiduras, aumentando el riesgo de asma, enfermedades cardíacas y cáncer, y causando la muerte prematura de miles de personas cada año.⁷⁰

Según el Ministerio de Minas y Energía (MME), Samacá es el municipio de Boyacá con mayor tradición de explotación de carbono con un alto grado de informalidad ya que en el año 2013 sólo el 17% de las unidades de producción minera (UPM) a mediana escala estaban abaladas con un título minero. En consecuencia, muchas prácticas no cuentan con la legalidad necesaria para operar, lo que genera impactos en el medio ambiente, las comunidades y sus colaboradores. Esta informalidad ha generado que Boyacá sea el departamento con mayor accidentalidad minera del país, pues según datos de la Agencia Nacional de Minería (ANM) el 85% de las

⁶⁹ SYMMES COBB, Julia. Producción colombiana de carbón probablemente se mantendrá estable en 2019, dicen compañías. [en línea]. Colombia. 2019. [Consultado: 10 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://la.reuters.com/articulo/colombia-carbon-idltakcn1q229g>

⁷⁰ GREENPEACE. El lado oscuro del carbón. [en línea]. España. 2018. [Consultado: 12 de agosto de 2019] Disponible en: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/carbon/el-lado-oscuro-del-carbon/>

emergencias registradas en el 2014 se presentaron en este departamento y fueron consecuencia de la minería subterránea de carbón.⁷¹

En lo referente al uso del carbón como combustible sólido para cocinar, la Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que esta práctica “produce elevados niveles de contaminación del aire en interiores, ya que se liberan elementos peligrosos para la salud como partículas de hollín que penetran profundamente en los pulmones” y aunque parezca un método que ha sido reemplazado a lo largo de los años, esta organización afirma que en la actualidad hay al menos 3.000 millones de personas en el mundo que siguen cocinando y calentando sus hogares con este tipo de combustible.⁷²

El agravante de esta situación es que la mayoría de los hogares que siguen utilizando este combustible son humildes y contruidos por ellos mismos, lo que implica que carecen de un buen sistema de ventilación y en viviendas mal ventiladas, se pueden producir concentraciones de partículas finas 100 veces superiores a las aceptables. Problemática que afecta adicionalmente el PIB de Colombia, pues según un informe realizado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) “los costos por mortalidad prematura y atención de enfermedades relacionadas a la degradación del aire interior superaron en el 2015 los 3 billones de pesos equivalentes al 0,38 por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) de Colombia del 2015”⁷³

2.2.2 Madera. Es el recurso renovable de origen vegetal más explotado por el hombre desde el inicio de su existencia. Se encuentra en el tronco de los árboles y su parte más sólida se sitúa debajo de la corteza del árbol. Su aplicación data del descubrimiento del fuego y en la actualidad es utilizado como combustible en los países menos desarrollados para cocinar y obtener calor, también tiene aplicaciones en la construcción, carpintería y embarcaciones, para la obtención de derivados como papel y cartón y en la fabricación de muebles en general.

⁷¹ ANM. Agencia Nacional de Minería reporta accidentes mineros en Boyacá y Caldas. [en línea]. Colombia. 2014. [Consultado: 10 de agosto de 2019] Disponible en: https://www.anm.gov.co/?q=ANM_reporta_accidentes_mineros_en_Boyaca_y_

⁷² ORTIZ FONNEGRA, María Isabel. Cocinar en leña o carbón causa el 17% de muertes por calidad del aire. [en línea]. En: El Tiempo, Medellín, Colombia. 26, junio, 2017. [Consultado: 6 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/cocinar-en-lena-o-carbon-causa-muertes-por-calidad-del-aire-103026>

⁷³ *Ibíd.*

Uno de los principales problemas que ocasiona el uso de la madera es la deforestación, puesto que se elimina gran parte de los bosques para darles un uso no forestal. El ministerio de ambiente registró 197.159 hectáreas de bosques naturales deforestados en el año 2018, lo que supuso una reducción de 22.814 hectáreas con respecto a las 219.973 registradas en 2017, lo que significa una reducción del 17% en la tasa de deforestación⁷⁴, mientras que en la amazonia brasileña el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) informó que, en julio de 2019 la deforestación alcanzó los 2.254 km², un 278% más que en el mismo mes del año anterior 2018 (596,6 km²)⁷⁵. Esta problemática refleja numerosos impactos entre los que se encuentran:

- La pérdida de biodiversidad, ya que, al reducir su hábitat, las poblaciones de muchas especies se ven obligadas a migrar y algunas incluso pierden la vida debido a los métodos de deforestación que incluyen incendios.
- La degradación del hábitat, por la fragmentación del bosque.
- La pérdida del suelo, debido a que aumenta las tasas de erosión, reduciendo la protección del suelo.
- Alteraciones climáticas y contribución al calentamiento global, al reducirse la capacidad para absorber el CO₂.
- La alteración del ciclo del agua y la pérdida de recursos para las poblaciones locales.⁷⁶

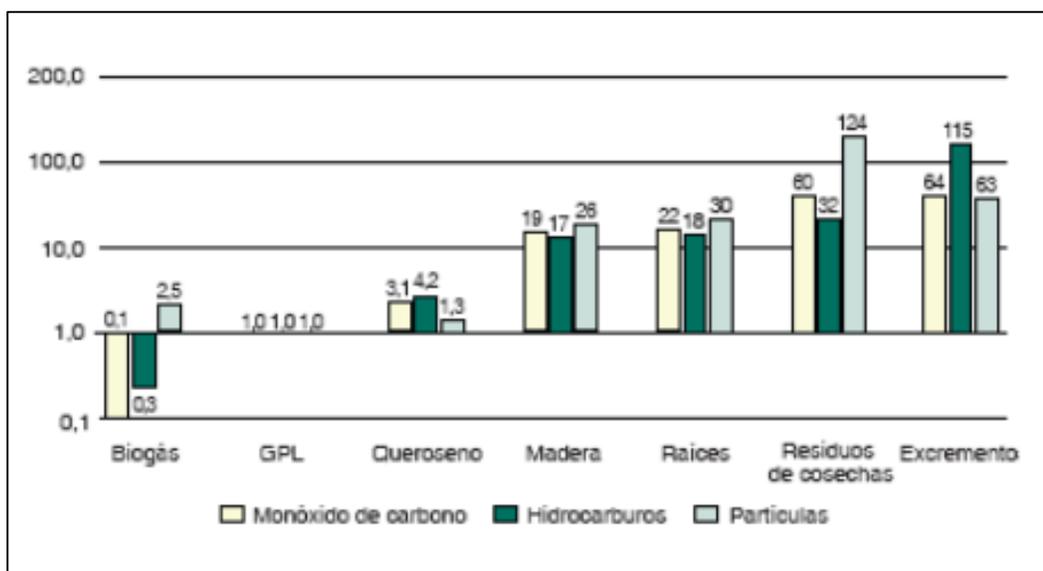
Otra problemática que refleja la madera, en comparación con otros combustibles de origen biológico y fósil es que cuando se da una combustión incompleta y la leña no arde adecuadamente, da lugar a productos tales como monóxido de carbono, benceno, butadieno, formaldehído, hidrocarburos poliaromáticos y otros compuestos que además de ser perjudiciales para la salud, se encuentran en proporciones muy elevadas, como evidencia la **figura 6**.

⁷⁴ CARACOL RADIO. Por primera vez en 10 años se reducen índices de deforestación en Colombia. [en línea] Colombia. 2019. [Consultado: 7 de septiembre de 2019] Disponible en: https://caracol.com.co/radio/2019/07/10/nacional/1562779685_799955.html

⁷⁵ SEMANA. Alemania recorta ayudas por aumento de la deforestación en la Amazonia. [en línea]. Semana sostenible. Impacto. Colombia. 2019. [Consultado: 7 de septiembre de 2019] Disponible en: <https://sostenibilidad.semana.com/impacto/articulo/alemania-recorta-ayudas-ante-deforestacion-en-la-amazonia/45323>

⁷⁶ GARCÍA, J. La deforestación nos lleva hacia un mundo sin bosques. [en línea] España. 2017. [Consultado: 6 de agosto de 2019] Disponible en: <http://www.vidasostenible.org/informes/la-deforestacion-nos-lleva-hacia-un-mundo-sin-bosques/>

Figura 6. Escala de las emisiones contaminantes generadas en la cocina por diferentes tipos de combustible (1,0 en escala)



Fuente: SMITH y ROGERS. Household fuels and ill-health in developing countries. 2005. Citado por: SMITH Kirk. El uso doméstico de leña en los países en desarrollo y sus repercusiones en la salud. 2006. [en línea]. *Unasylva* 224, Vol. 57, pp. 41-44. Disponible en: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/009/a0789s/a0789s09.pdf>

Estos productos causan diversos efectos para la salud como: infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores (pneumonía) en niños pequeños, principal causa de mortalidad infantil en todo el mundo, enfermedades pulmonares obstructivas, como bronquitis crónica y enfisema, en mujeres adultas que durante muchos años han cocinado con combustibles sólidos en ambientes con poca ventilación.⁷⁷

Para mitigar este problema es de vital importancia la restauración de los bosques y los ecosistemas destruidos. Adicionalmente, la leña y otros combustibles provenientes de la biomasa pueden quemarse en combustión limpia, con la tecnología correcta y desempeñar así un papel a largo plazo en el desarrollo sostenible cuando se recolecten de manera renovable.

⁷⁷ VARGAS, Sandra. ONATRA, William, OSORNO, Lucia & Páez, E. Contaminación atmosférica y efectos respiratorios en niños, mujeres embarazadas y adultos mayores. [en línea] Revista UDCA: 2008. Disponible en: <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/600/552>

2.2.3 Cascarilla de arroz. Es el principal desecho generado en la industria arrocera, constituye el 20% en peso de la producción total en una planta y su principal problemática radica en que después del proceso de pilado es separada, formando montañas de residuos que debido sus propiedades fisicoquímicas dificultan su degradación y disposición final.⁷⁸

Los principales componentes de la cascarilla de arroz son la celulosa y la hemicelulosa, además de lignina y compuestos orgánicos como aceites, proteínas y minerales. Y en lo que respecta a la composición de la biomasa, detallados en la tabla 3, es posible determinar algunos parámetros necesarios para alcanzar una combustión óptima, de ser utilizada como combustible.

Tabla 4. Composición de la biomasa de la cascarilla de arroz

Compuestos	Composición (%)
Fibra bruta	34,3 - 41,6
Cenizas	14,2 - 24,6
Proteínas	1,9 - 6,2
Grasas	0,4 - 1,5
Celulosa	37,2 - 43,2
Hemicelulosa	17,2 - 22,2
Azucares	0,2 - 0,4

Fuente: elaboración propia, con base en NATARAJAN, E; NORDIN, A y RAO, N. Overview of combustión and gasification of rice husk in fluidized bed reactor. Biomass and Bionergy. 1998. p.533-540

Los componentes principales de la planta de arroz son:

- El germen, parte más rica en nutrientes, ácidos grasos, aminoácidos y enzimas; se constituye en la parte germinal que da lugar al crecimiento del grano.
- El endospermo, representa alrededor del 70% del volumen del grano y constituye al final del proceso el producto denominado arroz blanco.
- La cutícula o polvillo, el cual alcanza un 6,8% en volumen en el grano de arroz, utilizado como alimento para animales por su alto contenido de grasas.
- La cáscara o pajilla, constituye aproximadamente 20% en peso del grano y es separada en el proceso de pilado.⁷⁹

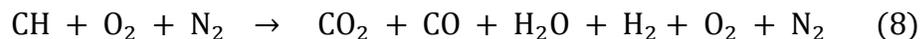
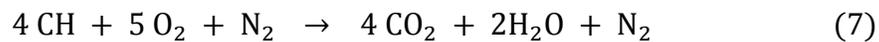
⁷⁸ SIERRA, Jaider. Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Monografía. Universidad de Sucre. Sincelejo: 2009.

⁷⁹ Ibíd.

Incluye además diversas sustancias de carácter inorgánico como SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO, CaO, Fe₂O₃, MnO, P₂O₅, las cuales ocasionan que su aplicación en campos como la elaboración de alimentos sea restringida, debido a que su alto contenido de Silice (SiO₂), sustancia considerada como cancerígena para el ser humano y que además es muy difícil de digerir. Usualmente la cascarilla es incinerada para reducir su volumen, ya que su baja densidad ocasiona que, al apilarse, ocupe grandes espacios; con este proceso puede ser aprovechada como combustible, pues tiene un potencial calorífico similar al de la madera⁸⁰.

La reacción de combustión de la cascarilla de arroz se presenta a continuación:

Ecuación 5. Reacción balanceada y general de combustión de la cascarilla



Fuente: VARÓN, Javier. Caracterización térmica y estequiométrica de la combustión de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*: 2004. UTP, Vol.10, Nro.24, pp.139-144. ISSN: 0122-1701.

La reacción (7) representa la ecuación química de la combustión balanceada en su forma general, mientras que en la reacción (8) se detallan los componentes que pueden aparecer según las condiciones de oxigenación que presente la combustión. En el caso de tener una deficiencia en el comburente, es decir, falta de oxigenación, las principales especies producidas serán CO y N₂. Para evitar esto y teniendo en cuenta las características fisicoquímicas de la cascarilla, este proceso requiere de excesos de aire durante su combustión, en este caso, los productos de la reacción (8) no incluirán el CO ni el H₂ debido a la poca cantidad de combustible en relación con la del comburente, por lo que, al agotarse el oxígeno, las especies de mayor proporción en los productos de la reacción serán el CO₂ y H₂O.⁸¹

Un análisis térmico de la combustión de la cascarilla realizado por la Unión de Arroceros S.A, del Tolima⁸² demostró que el poder calorífico de la cascarilla de arroz en esta zona es de 15.223,5 kJ/kg, que en función de su composición molar es igual a 198.193 kJ/mol.⁸³

⁸⁰ Ibíd.

⁸¹ VARÓN, Javier. Caracterización térmica y estequiométrica de la combustión de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*: 2004. UTP, Vol.10, Nro.24, pp.139-144. ISSN: 0122-1701. p.141.

⁸² UNIÓN DE ARROCEROS S.A. Propiedades químicas y físicas de la cascarilla de arroz. 1992. Molino San Joaquín. Espinal.

⁸³ VARÓN. Op. Cit, p.143.

Otra parte de la cascarilla es comercializada para uso en caballerizas, establos y jardinería y actividades que no poseen la capacidad de consumir toda la biomasa disponible, algunas estimaciones establecen que las aplicaciones que se le dan a la cascarilla de arroz, no son más del 5% de la que se produce.⁸⁴ Y en la actualidad, la solución más rápida para deshacerse de ella, es su quema, ocasionando la generación de contaminantes perjudiciales para la salud, pues en este proceso se genera del 14-25% de cenizas ricas en sílice (94.5 %) dependiendo de la variedad de arroz, clima y suelo de la región.⁸⁵

Según la Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz), para el 2017, la producción de cascarilla de arroz en Colombia fue de tan solo 100.000 toneladas anuales, cifra que, a pesar de ser pequeña, representa un problema, ya que en la actualidad no existe una alternativa que permita su disposición adecuada o inclusión en un proceso industrial productivo, que asegure el aprovechamiento de los residuos y evite los vertimientos de la cascarilla a campo abierto o directamente sobre los cuerpos de agua.

2.2.3.1 Aplicaciones de la cascarilla de arroz en Colombia. Las experiencias más relevantes de aprovechamiento de este subproducto van desde la obtención de etanol, concreto, cemento, cerámicas, dióxido de SiO₂, nitruro de silicio; pasando por su aplicación como material de relleno para uso agropecuario, como fuente energética para compañías como Alienergy (ladrilleras, cementeras y tabacaleras), hasta como aditivo para obtener otros materiales (aglomerados-tableros y materiales aislantes para construcción).⁸⁶

A continuación, se presentan otras aplicaciones de la cascarilla de arroz en el país:

- Fogón de cascarilla: Presenta varios beneficios como: fácil encendido, bajos niveles de humo, bajo costo de compra y funcionamiento, fabricación sencilla y de fácil recarga.⁸⁷

⁸⁴ PIÑEROS CASTRO, Yineth. Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia. [en línea]. Bogotá. 2014. Página 14. [Consultado: 9 de octubre de 2019]. Disponible en: http://avalon.utadeo.edu.co/servicios/ebooks/2015/aprovechamiento_de_biomasa/files/assets/basic-html/page14.html

⁸⁵ PRADA, A y CORTÉS, C. La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral. *Revista Orinoquia*: 2010. Vol.14. Nro.1. ISSN. 155-170

⁸⁶ Alternativas integrales de energía renovable (Alienergy). Aprovechamiento cascarilla de arroz. [en línea] Colombia. 2010. [Consultado: 6 de agosto de 2019] Disponible en: http://www.alienergy.com.co/proyectos_3.html

⁸⁷ *Ibíd.*

- Como combustible en el secado de cereales (Proyecto ciclones convenio Colciencias Universidad del Norte): se realizó el diseño y construcción de un nuevo horno para mejorar la vida útil del equipo, disminuir el costo de fabricación y el consumo de energía, así como cumplir con las normas técnicas internacionales para prevenir la contaminación ambiental.⁸⁸
- Experiencias de implementación de producción más limpia en la Empresa Arrocería Diana del Tolima: sustituyeron el carbón por la cascarilla de arroz, evitando costos adicionales y la necesidad de adquirir equipos para comprimir y almacenar la cascarilla. Obteniendo beneficios económicos por el reemplazo del carbón al sistema de cascarilla, una reducción en el tiempo de secado de los granos y un proceso más eficiente.⁸⁹
- Fabricación de cemento, materiales cerámicos y distintas variedades de vidrio: debido a su alto contenido de dióxido de Silicio (SiO₂), componente principal de la arena, que, al fundirse con otros óxidos metálicos, puede dar lugar a estos materiales.

Adicionalmente, en Latinoamérica se han realizado estudios para el aprovechamiento de la cascarilla como:

- Combustible alternativo para uso doméstico, pues la celulosa y sílice que la componen, ayudan a mejorar los rendimientos como combustible, lo que representa un avance en el desarrollo de tecnologías limpias y económicas, pues actualmente, en Perú se generan 380,000 TM de cascarilla de arroz, cantidad que equivale a 120.000 TEP (toneladas equivalentes de petróleo) por año de energía, de las cuales se ha estimado que el 60% podrían ser utilizadas.⁹⁰
- Regeneración de tierras de cultivos a través de compostas, por tratarse de un material orgánico y en México es utilizada en granjas avícolas como camas donde se engorda a los pollos debido a sus propiedades fisicoquímicas.⁹¹

⁸⁸ *Ibíd.*

⁸⁹ *Ibíd.*

⁹⁰ ASSUREIRA, E. Combustible alternativo: La cascarilla de arroz. 2002. Citado por: SIERRA, Jaider. Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Monografía. Universidad de Sucre. Sincelejo: 2009.

⁹¹ SALGADO, R. Cascarilla de arroz: un excelente sustituto de la madera. 2005. [Consultado el 11 de octubre 2019]

2.2.4 Matriz de selección para el combustible sólido. La problemática presentada con estas alternativas es criterio clave a la hora de la selección, teniendo en cuenta que lo que se quiere con este proyecto es no generar una mayor contribución al daño generado, si no por el contrario, ayudar a su mitigación o solucionarlo. Por su parte, el riesgo ambiental va de la mano con el riesgo social, debido a que uno es consecuencia del otro; si se generan grandes cantidades de emisiones de GEI a la atmósfera, los afectados serán los seres vivos, ya sea por su inhalación, por los residuos contaminados que puedan llegar a fuentes hídricas o el suelo y estos sean de uso humano, por la repercusión que tienen algunas de estas actividades en el cambio climático, por la quema de árboles, entre otros.

Teniendo en cuenta la problemática e implicaciones ambientales y sociales que presentan los combustibles sólidos descritos previamente, se realizó una matriz de selección para identificar y determinar de manera cuantitativa el combustible sólido cuya utilización represente la menor cantidad de riesgos posibles y que por el contrario su uso contrarreste las problemáticas presentadas en cada criterio analizado.

Para este caso, los criterios evaluados fueron: costos, producción anual, riesgos ambientales y riesgos sociales, y se le asignó un porcentaje de acuerdo con la importancia e implicaciones que representa cada uno, se detalló adicionalmente el valor máximo de la ponderación, de modo que, al sumar los valores asignadas a cada criterio, el puntaje final obtenido sea cercano al 100%

Cuadro 1. Matriz de selección de los combustibles sólidos con los criterios a analizar

ALTERNATIVAS DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS			
CRITERIO	CARBÓN	MADERA	CASCARILLA DE ARROZ
Principales problemas	<ul style="list-style-type: none"> Se produce a partir de una serie de procesos químicos y variaciones de P y T. Emite gran cantidad de GEI, especialmente CO₂, monóxido de carbono y partículas de hollín. Genera repercusiones en el PIB del país: 0,38% en el 2015. 	<ul style="list-style-type: none"> Representa una amenaza para la fauna y flora por la deforestación de bosques y selvas. Libera más partículas de CO, benceno, butadieno, formaldehídos e hidrocarburos durante la combustión incompleta que otros tipos de combustible. 	<ul style="list-style-type: none"> Constituye el 20% en peso de la producción total de una planta arrocera. Una producción de 5.8 Ton/Ha de arroz genera 580.000 Ton de cascarilla al año. Uso restringido debido a su alto contenido de sílice.
Precios (\$/kg)	15.000 - 20.000	7.000 - 20.000	2.000-10.000 (Gratis)
Producción anual	89,5 millones de toneladas [2017]	197.159 hectáreas deforestadas [2018]	100.000 toneladas [2017]
Riesgo ambiental	<ul style="list-style-type: none"> Grandes emisiones de GEI: CO, CO₂ y H₂. Se filtra en la tierra y el agua Produce altos niveles de contaminación en el aire. 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdida de biodiversidad y deterioro de ecosistemas. Repercusión en el cambio climático (por el aumento de CO₂). Aumento en la erosión del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> Al quemarse genera (14-25) % de cenizas ricas en sílice Contaminación del suelo y cuerpos de agua debido a una mala disposición final.
Riesgo social	<ul style="list-style-type: none"> Enfermedades como asma, cáncer y muerte prematura. 3.000 millones de personas expuestas. Su minería informal es considerada la principal emergencia registrada. 	<ul style="list-style-type: none"> Alteraciones del ciclo del agua y pérdida de recursos. Principal causa de la mortalidad infantil en el mundo y de enfermedades como bronquitis crónica, afecciones pulmonares y enfisema. 	Posible afectación en la salud por su alto contenido de SiO ₂ (sustancia considerada como cancerígena y difícil de digerir)
Solución	<ul style="list-style-type: none"> Disminuir su uso al mínimo. Tanto para su producción como en su combustión disponer de ambientes con gran ventilación. 		Encontrar una aplicación para mitigar su masiva generación

Fuente: elaboración propia con base en las referencias citadas en las p.37-44.

Los porcentajes quedaron establecidos de la siguiente manera: problemática (30%) por lo que el puntaje variaba entre 0 y 30, precio/kg, riesgo ambiental y riesgo social (20%) con un rango entre 0 y 20, y producción anual (10%) con rango entre 0 y 10, y así, obtener un puntaje total del 100%. Finalmente, los valores obtenidos fueron los siguientes:

Cuadro 2. Ponderación de los criterios de la matriz de selección

CRITERIO	SOLUCIÓN PRESENTADA CON LA ALTERNATIVA SELECCIONADA		
	CARBÓN	MADERA	CASCARILLA DE ARROZ
Problemática (Hasta 30%)	05	01	30
Costos (\$/kg) (Hasta 20%)	10	15	20
Producción anual (Hasta 10%)	01	01	10
Riesgo ambiental (Hasta 20%)	10	01	10
Riesgo social (Hasta 20%)	01	02	03
Puntaje total 100%	27%	20%	73%

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los porcentajes finales obtenidos en el **cuadro 2**, la alternativa seleccionada como combustible sólido, es la cascarilla de arroz, pues tal como indica el **cuadro 1**, su utilización plantea una solución efectiva a los criterios evaluados, muy por encima de las otras opciones contempladas, esto se debe principalmente a que es más benéfico aprovechar un residuo proveniente de un proceso para la generación de otro proceso, lo que resulta además muy benéfico para el medio ambiente, a diferencia de utilizar un combustible que se origina a partir de una serie de modificaciones físico-químicas y que por el contrario requieren de un gasto energético adicional y generan un gran número de emisiones contaminantes a la atmósfera que es lo que se quiere evitar.

Por otro lado, la cascarilla de arroz presenta excelentes propiedades combustibles, que pese a tener un poder calorífico bajo, tras la ignición su combustión se vuelve muy estable, característica de gran importancia para su uso como emisor de CO₂ durante el proceso de combustión.

2.3 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN

Para recrear un proceso de combustión fija, el montaje diseñado consiste en un gasificador tipo cohete, las ventajas que presentan estos reactores son: su funcionamiento simple, su fácil diseño y operación, y que genera un contacto íntimo entre las partículas ocasionando un aumento en la conversión de carbono.⁹² Adicionalmente, su diseño tipo cohete, se debe a que, una mayor altura evita que el gas generado se devuelva a la fuente, como consecuencia del aumento proporcional de la succión en el sistema.

En este proceso se debe mantener baja la proporción del combustible en relación a la del comburente⁹³, esto se logró instalando un ventilador en la parte inferior, con el fin de proporcionar la aireación necesaria al reactor, mejorando adicionalmente el flujo a lo largo del mismo y, por ende, una mayor eficiencia en la combustión, la cual se demuestra en la rapidez con la que alcanza su punto de ignición.

El material del que está constituido es acero inoxidable, debido a la alta resistencia al fuego y a la corrosión que presenta este material. El combustible, que en este caso es la cascarilla de arroz, se adiciona por medio del codo ubicado en la parte superior, donde cae por acción de la gravedad a la zona inferior del reactor, lugar en el que ocurre la reacción estacionaria de combustión y que se encuentra soportada por una rejilla.

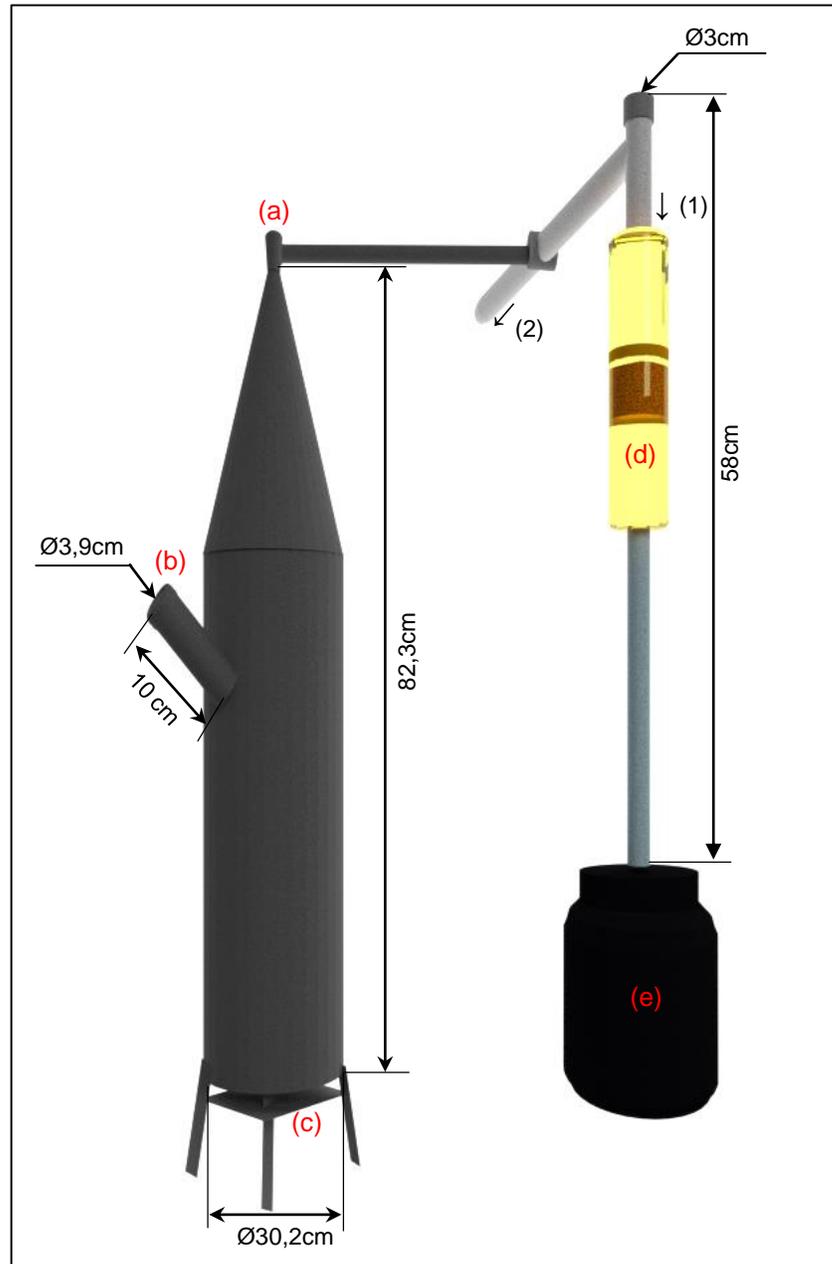
Las dimensiones y partes del reactor se detallan en la **figura 7**. En esta se evidencia, además, que el reactor cuenta con dos salidas: una por la que fluyen los gases derivados del proceso de combustión (1), utilizados para la evaluación del cultivo y

⁹² CALVAY, J. Diseño y construcción de un gasificador de lecho fijo para la producción de gas de síntesis. 2018. [en línea]. [consultado el 2 de noviembre de 2019]. Disponible en: https://issuu.com/jcalvay/docs/disen_o_y_construccion_de_un_gasifi

⁹³ Moreno, G; Serrano, J y Palacios, J. Desempeño de la combustión de desechos industriales en un reactor de lecho fluidizado burbujeante. Universidad de Pamplona. p.255. Colombia: 2009. ISSN 0123-2126

la otra salida (2), sirve para condensar los demás gases de combustión y hacer muestras del vapor de la cascarilla.

Figura 7. Dimensiones y partes del reactor de combustión



Fuente: elaboración propia, realizado en Blender® v2.79.
Partes: (a) Gasificador de combustión tipo cohete; (b) Codo por el que se suministra el alimento; (c) Rejilla que soporta la reacción de combustión; (d) Tubo transparente de plástico para el seguimiento del gas de combustión; (e) Recipiente contenedor del compresor.

Debido a que el reactor no cuenta con la presión suficiente para llenar el contenedor, fue necesario el uso de un compresor para conducir los gases generados, al interior de la almohada inflable, que hará las veces de contenedor. Este compresor se dispuso en el interior de un recipiente plástico que se selló herméticamente con caucho de silicona para mantener la presión en su interior, adicionalmente se le acopló una manguera del mismo diámetro de entrada de la almohada, para permitir el flujo del gas de combustión que será almacenado, como muestra la siguiente figura:

Figura 8. Montaje necesario para el almacenamiento del gas de combustión.



Fuente: elaboración propia, realizado en Blender® v2.79

2.4 ALMACENAMIENTO DEL GAS DE COMBUSTIÓN

Con el fin de almacenar el gas producido en el reactor, para evitar la generación continua de gases de combustión, especialmente de CO_2 a la atmósfera, se utilizó una almohada inflable, la cual cumple con las condiciones de permeabilidad y cierre hermético necesarias para mantener la composición y las características fisicoquímicas de los gases de combustión contenidos en su interior.

Además de sus características tanto físicas como económicas, se optó por la opción de la almohada inflable teniendo en cuenta el volumen de los reactores, los cuales requieren de un contenedor proporcional a su tamaño, y dadas las dimensiones de la almohada que son: largo 42 cm, ancho 26 cm y 10 cm de espesor (**figura 9**), es posible almacenar una cantidad aproximada de 10.920 cm³ de gas de combustión. Cifra que permite un suministro a los reactores por un periodo entre 2 a 5 meses de acuerdo con las cantidades extraídas.

Una ventaja adicional de este método de almacenamiento es que gracias a su tamaño se logró una manipulación cómoda a la hora de tomar las alícuotas del gas contenido para su inyección a los reactores o para la realización de pruebas de concentración, consideraciones que lo catalogan como un método práctico y efectivo de almacenamiento de gas para este tipo de pruebas.

Figura 9. Contenedor de los gases de combustión



Fuente: elaboración propia.

2.4.1 Pruebas de permeabilidad. Con el fin de comprobar la impermeabilidad de la almohada y su hermeticidad para evitar que los gases contenidos en su interior escapen a la atmósfera, se hicieron dos pruebas no destructivas: de fuga y de burbuja.

2.4.1.1 Prueba de fuga. Como su nombre lo indica, sirve para la detección y localización de fugas en el sistema de almacenamiento, con el fin de prevenir la pérdida o contaminación de los gases contenidos y permitir su preservación interna.⁹⁴ Se realizó sumergiendo la almohada en un contenedor de agua, mientras se presionaba en distintas zonas para verificar la ausencia de burbujas tras dicha compresión (**figura 10**). Se repitió esta prueba 3 veces, en distintos momentos para asegurar que el sistema preservara su cierre hermético.

2.4.1.2 Prueba de burbuja. Consiste en utilizar la presión del elemento a analizar para identificar la presencia de fugas, esto debido a la aparición de burbujas de aire, que, a diferencia de la prueba anterior, no requiere el uso de agua, sino de una solución de jabón, con la que se cubrirán las zonas a evaluar.

Figura 10. Ausencia de burbujas tras la prueba



Fuente: elaboración propia

⁹⁴ CORONADO, E. Pruebas no destructivas de hermeticidad. Metalografía, Universidad Tecnológica de Pereira. [en línea]. 2015. [Consultado el 18, octubre, 2015]. Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/12-4-3-pruebas-no-destructivas-de-hermeticidad/>

El resultado en ambas pruebas determinó que la almohada se encontraba perfectamente hermética, cualidad que permite que los gases almacenados conserven las características y propiedades de la combustión, manteniéndolas constantes en el tiempo.

La extracción del gas contenido en la almohada para suministrar a los reactores se da a través del uso de jeringas. Esto se realiza perforando la tapa de la almohada inflable y para evitar el escape de los gases por ese pequeño orificio, se diseñan dos moldes en caucho de silicona, con el fin de cubrir doblemente la tapa cuando el proceso de inyección culmine (ver anexo 1). Finalmente se comprueba la hermeticidad de este método mediante la prueba de burbujas, arrojando nuevamente resultados satisfactorios.

2.5 ANÁLISIS DEL SISTEMA

Para evaluar el comportamiento en conjunto del sistema de combustión, se analizaron los siguientes parámetros:

2.5.1 Flujo de la emisión. Debido a que al reactor de combustión no cuenta con la presión necesaria para llenar la almohada, se le acopló un compresor, para permitir el almacenamiento de los gases emitidos. El flujo de la emisión se verá condicionado por el flujo del compresor, el cual se verificó mediante un rotámetro, dispositivo industrial empleado para medir el caudal de líquidos y gases; obteniendo un valor cercano a 1 L/min, pero cuyo valor real no pudo determinarse debido al rango de medida del instrumento; para esto, se procedió a determinar el tiempo de llenado de la almohada con el compresor y se realizaron 3 réplicas de este proceso, obteniendo un promedio de llenado igual a 17:06 minutos. Con los datos de volumen (10,92 L) y tiempo fue posible determinar el flujo real del compresor, que fue de 0,64L/min (9).

Teniendo en cuenta que el caudal del compresor se puede ver afectado por el flujo adicional proveniente del reactor de combustión, se determinó el tiempo de llenado de la almohada con el sistema completo (reactor + compresor) que fue de 13:02 minutos. En este caso no se realizaron más repeticiones debido a que el compresor acoplado al reactor emite un sonido proveniente de la succión generada cuando la almohada se llena completamente. Con el tiempo obtenido, se procedió a calcular el caudal real del sistema completo (10).

Ecuación 6. Flujo de emisión del sistema

$$Q_{bomba} = \frac{10,92 L}{17,06 min} = 0,64 L/min \quad (9)$$

$$Q_{sis.completo} = \frac{10,92 L}{13,02 min} = 0,84 L/min \quad (10)$$

Fuente: elaboración propia, con base en: LUX, Manuel. Medición de caudales. En: Medidores de flujo. Trabajo de grado [en línea]. Guatemala: 2010. p.31. Disponible en: <https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/13/1169/1195/1213/7173.pdf>

Obteniendo finalmente un flujo de emisión del sistema igual a 0,84L/min.

2.5.2 Cuantificación del CO₂ en la emisión. La composición de los gases generados en un proceso de combustión depende del tipo de combustible empleado, pero generalmente entre los productos de esta reacción se pueden encontrar: CO₂, N₂, NO_x, H₂, CO, SO_x, siendo el CO₂ y el N₂ los productos predominantes en la combustión de la cascarilla de arroz al utilizar un exceso de comburente durante la reacción.

Teniendo en cuenta lo anterior y con base en el objeto de estudio del proyecto, que es la biofijación de CO₂ por parte de las microalgas, la cuantificación de este gas en la combustión de la cascarilla de arroz se hace necesaria para analizar el crecimiento de estos microorganismos. Esta cuantificación se realizó por medio de la captura del CO₂ en una solución de hidróxido de sodio (NaOH).

Este método de absorción química, ha sido ampliamente utilizado para la cuantificación del CO₂ debido a su simpleza, pues la interacción de este compuesto con el NaOH, da lugar a una reacción irreversible, por medio de la cual el CO₂ es capturado. Snyder y Trofymow⁹⁵ demostraron que una solución de NaOH (2M) puede capturar 12 mg de CO₂-C⁹⁶. Una de las desventajas que presenta este método, es la baja solubilidad del CO₂ en agua, por lo que deben considerarse

⁹⁵ SNYDER, J.D. & TROFYMOW, J.A. A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil samples. 1984. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* Vol.15, pp. 587–597.

⁹⁶ CARTER, Martin & GREGORICH, E. Total and organic carbon. In: Soil sampling and methods of analysis. 2nd ed. Boca Raton, FL. Taylor & Francis Group. ISBN-13: 978-0-8493-3586-0. p.162.

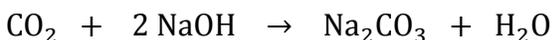
parámetros que eleven este valor, como un aumento en la temperatura y el uso de un sistema de agitación.⁹⁷

Con base en los referentes mencionados previamente, el procedimiento consistió en preparar una solución de 1,6g de NaOH en 200mL de agua, teniendo en cuenta la proporción estequiométrica de la reacción (2:1), y se adicionaron unas gotas de fenolftaleína como indicador de pH, que al entrar en contacto en un medio básico como este (por encima de 8), cuyo pH oscila entre 12-14, se tornará color fucsia. Cabe resaltar que dicha solución se realizó en un recipiente sellado herméticamente y adaptado para la inyección del gas de combustión, además de ser sometido a un sistema de agitación para aumentar la transferencia de masa de las moléculas entre las fases.

La inyección del gas de combustión se llevó a cabo por medio de una jeringa, con el fin de suministrar un volumen conocido a la solución. Con esta se extrajeron 40mL del gas almacenado, que al ser inyectados desplazaron un volumen igual a 36 mL en el reservorio, como se puede observar en la **figura 11**.

Cuando el CO₂ entra en contacto con la solución, empieza a reaccionar de acuerdo con la **ecuación 7**, formando carbonato de sodio (Na₂CO₃) y agua. En el momento que el NaOH empieza a desaparecer para dar lugar a dicho producto, el pH irá disminuyendo (menor a 8), hecho que se evidencia con la pérdida de tonalidad de la solución.

Ecuación 7. Reacción de absorción de CO₂ con NaOH



Fuente: HERSKOWITS, D. HERSKOWITS, V. STEPHAN, K. & TAMIR, A. Caracterización de un absorbedor de chorro de impacto bifásico II. Absorción con reacción química de CO₂ en soluciones de NaOH. *Ciencia de Ingeniería Química*: 1990. Vol.45, Nro.5, pp.1281-1287. DOI: 10.1016 / 0009-2509 (90) 87120-h

⁹⁷ CHIA-YING, Chianga. DE-WEI, Lee & HWAI-SHEN, Liub. Carbon dioxide capture by sodium hydroxide-glycerol aqueous solution in a rotating packed bed. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*: 2017. Vol.72, pp.29-36. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.023>

Figura 11. Interacción del CO_2 con NaOH



Fuente: elaboración propia.

Dado que la concentración del NaOH se encuentra al doble que la del CO_2 , la pérdida de tonalidad demuestra, que este gas reaccionó completamente, ocasionando adicionalmente una ligera disminución en el volumen del reservorio acoplado al recipiente. Este dato sirve para calcular la presión hidrostática del sistema (**ecuación 8**), la cual es función de la altura del fluido, para posteriormente ser utilizada en la ecuación de gases ideales (**ecuación 9**) para despejar las moles totales de CO_2 presentes en 40 mL de gas de combustión.

Ecuación 8. Presión hidrostática.

Presión hidrostática:	$P = P_1 + P_{atm}$
Donde:	$P_1 = \rho g \Delta h$

Fuente: elaboración propia, con base en: ÇENGEL, Y. BOLES, M. PEDRAZA, C. CHÁVEZ, N. & CÁRDENAS, J. Variación de la P con la profundidad. En: *Térmodynamica*. São Paulo: McGraw-Hill: 2006. Vol.10. p.24.

Ecuación 9. Ecuación de estado de gas ideal.

Ec. de gases ideales:	$PV = nRT$
Despejando n;	$n_{CO_2} = \frac{PV}{RT}$

Fuente: elaboración propia, con base en: ÇENGEL, Y. BOLES, M. PEDRAZA, C. CHÁVEZ, N. & CÁRDENAS, J. Ecuación de estado. En: *Térmodynamica*. São Paulo: McGraw-Hill: 2006. Vol.10. p.137.

Dada la diferencia de alturas entre el fluido en recipiente y la del reservorio, las cuales demuestran la desaparición del CO₂, se tiene que, la cantidad molar de este gas en 40 mL de gas de combustión inyectado fueron:

Ecuación 10. Cálculo de las moles de CO₂ en 40mL de gas de combustión de cascarilla

$P_H = \left(1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0,12m \right) + 101325Pa = 102501 Pa$
$n_{CO_2} = \frac{1,01161atm \cdot 0,036L}{0,08206 atm \cdot L/mol \cdot K \cdot 293,15 K} = 0,001514 mol_{CO_2}$

Cabe aclarar que los resultados obtenidos con la ecuación 9 son una estimación del valor real, pues este puede verse afectado por factores como: la temperatura, la presión y el volumen, siendo los primeros, parámetros que permanecen constantes a condiciones normales, hecho que permite el uso de la ecuación de estado. Así mismo, dado que el volumen es directamente proporcional al número de moles, este procedimiento deberá realizarse cada vez que se quiera conocer la concentración en un volumen de inyección diferente.

Otra desventaja que puede llegarse a presentar con este método es la presencia de componentes volátiles en la combustión, que pueden interferir con el resultado final, por lo que si se desea conocer con alta precisión la concentración de CO₂ presente en un gas de combustión, se recomiendan métodos más especializados como el uso de sensores de CO₂ o análisis cromatográficos de la emisión, pero teniendo en cuenta que este método se realizó con el fin de analizar la eficiencia de la combustión del reactor, los resultados obtenidos y la practicidad del método, son suficientes para demostrar la presencia y concentración aproximada del CO₂ en un volumen determinado de gas, proveniente de la combustión de la cascarilla de arroz.

2.5.3 Eficiencia de combustión. La eficiencia de la combustión hace referencia a la relación que existe entre el calor útil y el calor suministrado por el combustible. De acuerdo a las características mencionadas en el numeral 1.4, esta relación depende de factores como: la temperatura de ignición, el contenido de humedad del sólido, el contenido de cenizas, la velocidad de propagación, entre otros.

Para determinar la eficiencia del reactor de combustión, se analizaron los primeros tres factores mencionados, y los resultados obtenidos se describen a continuación:

- **Temperatura.** Para lograr una combustión eficiente, es necesario que el combustible alcance la temperatura de ignición para que comience a arder adecuadamente evitando la presencia de residuos inquemados como el hollín.

Teniendo en cuenta que los requerimientos del proyecto se basan en la generación de gases de combustión y no en la generación de calor, no será necesario que el reactor alcance la temperatura de ignición de la cascarilla de arroz (680°C)⁹⁸, por esta razón no se realizó ningún tipo de recubrimiento al cuerpo del gasificador, que como se mencionó en el numeral 2.3, está compuesto por acero inoxidable, material que carece de aislamiento térmico.

Con base en esta afirmación, se midió la temperatura de combustión alcanzada por el reactor, mediante una cámara térmica, obteniendo un valor entre 113 y 115°C en su punto máximo.

⁹⁸ TIPANLUISA, L. Caracterización de los productos de combustión de la cascarilla de arroz utilizando un sistema térmico con capacidad de 60.000Kcal/h. Duraspace. 2012. [en línea]. [Consultado el 30 de octubre, 2019]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/5191>

- **Contenido de humedad.** El contenido de humedad expresado en forma de porcentaje (%), es la relación que existe entre el peso de agua contenida en la muestra en estado natural y el peso de la muestra después de ser secada en el horno. En este caso, la muestra corresponde a cascarilla de arroz, proveniente de Alvarado Tolima.

Para la determinación de este parámetro se utilizó el método de secado al horno, equipo utilizado para recrear las condiciones que se tendrían en una combustión completa de cascarilla; en este, la muestra se calienta bajo condiciones específicas y la pérdida de peso se utiliza para calcular el contenido de humedad de la cascarilla. Este valor es dependiente del tipo de horno y de las condiciones de operación en su interior, como el tiempo y la temperatura de secado.

Para esto, se utilizaron 3 cápsulas limpias, secadas previamente en la mufla durante 40 minutos, se pesaron y a cada una se le agregó una muestra de 3g de cascarilla de arroz, esta cantidad se pesó nuevamente en la balanza analítica y las capsulas se llevaron posteriormente al horno, a una temperatura de 550°C durante 2 horas. Pasado este tiempo, se dejaron en un desecador durante 10 minutos y finalmente se volvieron a pesar las muestras de ceniza, libre de humedad, obteniendo los siguientes datos:

Tabla 5. Datos teóricos de Cascarilla por combustión completa

Peso cápsula vacía (g)	Peso biomasa [cascarilla] (g)	Peso cápsula + peso cascarilla (g)	Ceniza + cápsula (g)	Ceniza total (g)	Peso biomasa - ceniza total
29,8035	3,0025	32,8060	30,2348	0,4313	2,5712
32,3276	3,0063	35,3339	32,7739	0,4463	2,5600
23,0016	3,0056	26,0072	23,4464	0,4448	2,5608
Promedio	3			0,4408	

Fuente: elaboración propia

Con el fin de comparar los resultados obtenidos, que corresponden al análisis de la ceniza de lo que sería una combustión completa, con la ceniza generada tras la combustión del reactor, se procedió a adicionar 9g de cascarilla de arroz al reactor (cifra que corresponde a la totalidad del peso que se dispuso en cada una de las cápsulas llevadas al horno), que después de la combustión generaron 1,082g de ceniza.

Figura 12. Ceniza obtenida tras la combustión en el reactor.



Fuente: elaboración propia.

Tal como se evidencia en la **figura 12**, la ceniza obtenida es negra en su mayoría, característica de una combustión incompleta, por lo que se llevó al horno para que los residuos inquemados terminaran su ciclo, hecho que se evidencia con generación de ceniza blanca, como ocurrió en el horno. Para esto, se agregaron de manera proporcional en 3 cápsulas previamente limpiadas, secadas y pesadas los 1,082g de ceniza y se llevaron al horno durante 2 horas a 550°C. Esto, teniendo en cuenta las pérdidas de energía ocasionadas por los escapes del reactor y el material con el que fue construido evitan que se alcance la temperatura necesaria para una combustión completa.

Luego del tiempo estipulado, se dejaron enfriar las cápsulas en el desecador y se tomaron los pesos respectivos, obteniendo:

Tabla 6. Datos de la ceniza producida en el reactor, luego de ser llevada a la mufla

Peso cápsula vacía (g)	Peso biomasa (g)	Peso cápsula + Peso cascarilla (g)	Ceniza + cápsula (g)	Ceniza total (combustión completa)	Peso biomasa - ceniza total
56,9212	9,0143	65,9355	57,6646	0,7434	8,2709

Fuente: elaboración propia.

Con estos datos y la **ecuación 11**, fue posible calcular el porcentaje de humedad alcanzado tras la combustión en el reactor, con el fin de compararlo con el porcentaje de humedad obtenido en el horno

Ecuación 11. Porcentaje de humedad en la muestra

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{Peso cápsula} + \text{muestra}) - (\text{Peso cápsula} + \text{muestra seca})}{\text{Peso cápsula}} \times 100$$

Fuente: elaboración propia, con base en: MALDONADO, R. Determinación de humedad. S.f. [en línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/laec/maldonado_z_r/apendiceQ.pdf

$$\% \text{ Humedad Horno} = \frac{(31,3824) - (28,8184)}{28,3775} \times 100 = \mathbf{9,035\%}$$
$$\% \text{ Humedad Reactor} = \frac{(65,9355) - (57,6646)}{56,9212} \times 100 = \mathbf{14,53\%}$$

Finalmente, el porcentaje (%) de humedad obtenido en el reactor, supera a la humedad presentada por el horno, cifra que se ve afectada por las pérdidas de energía detalladas previamente, las cuales afectan directamente la humedad de la muestra.

- **Contenido de cenizas.** Este parámetro es de vital importancia, pues permite realizar el balance de energía del reactor, además de determinar cuantitativamente la eficiencia de la combustión.⁹⁹

Para el análisis de la reducción de peso y volumen de la cascarilla de arroz después de la combustión se siguió la metodología utilizada por Moreno, G. Serrano, J. & Palacios, J.¹⁰⁰ Para esto se tomaron los datos de la **tabla 5**, para hallar la ceniza que se genera por 1g de cascarilla en una combustión completa (550°C) (11). Teniendo en cuenta que en el reactor se generaron 1,0818g de ceniza, se tomó este valor como base de cálculo para determinar la pérdida real de cascarilla y con esta determinar la eficiencia del reactor de combustión. Para

⁹⁹ MORENO, Gonzalo. SERRANO, Juan. & PALACIOS, Jhon. Desempeño de la combustión de desechos industriales en un reactor de lecho fluidizado burbujeante. Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia: 2009. pp.251-266. ISSN 0123-2126

¹⁰⁰ *Ibíd.* p.260.

comparar estos datos con los obtenidos tras la combustión incompleta del reactor se realizaron los siguientes cálculos a partir de la **tabla 5**

Ecuación 12. Cálculos necesarios para determinar la eficiencia del reactor

$$\text{Ceniza total} = \frac{0,4408\text{g Ceniza}}{3} = 0,1469\text{g Ceniza} \quad (11)$$

$$0,7434\text{g Ceniza} \times \frac{1,0818\text{g Cascarilla}}{0,1469\text{g Ceniza}} = 5,4745\text{g Cascarilla}$$

En la literatura, el rango de ceniza obtenido oscila entre los 11-25%¹⁰¹, para este caso se tomó como valor el 15% de ceniza para relacionarlo con una eficiencia del 100%. Para esto se calculó la cantidad de cascarilla perdida de forma teórica (12) y se comparó con la cantidad de cascarilla perdida realmente (13). Finalmente, la eficiencia se halló mediante un cociente entre la pérdida de cascarilla teórica sobre la real, obteniendo una eficiencia del 94,4% para el reactor de combustión. Cifra comparable con la eficiencia obtenida en proyectos similares.¹⁰²

Ecuación 13. Cálculos de la eficiencia del reactor de combustión

$$1 - 0,15 = 0,85 \quad (12)$$

$$5,4745\text{g Cascarilla} \times 0,85 = 4,6533\text{g de cascarilla perdidos} \quad (13)$$

$$(5,4745 - 1,0818)\text{g Cascarilla} = 4,3927\text{g de cascarilla perdidos} \quad (14)$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{4,3927\text{g}}{4,6533\text{g}} \times 100 = \mathbf{94,4\%}$$

¹⁰¹ VARÓN. Op. Cit, p.139.

¹⁰² MORENO, SERRANO & PALACIOS. Op. Cit. 262.

3. CULTIVO DE MICROALGAS EN EL FOTOBIORREACTOR

Como bien se ha dicho, las microalgas son microorganismos excepcionales para la biofijación del CO₂, además de representar una alternativa económica y sostenible para la reducción de las emisiones de GEI presentes en la atmósfera, ya que para su crecimiento requieren de factores como agua, luz, nutrientes como nitrógeno y fósforo, CO₂, entre otros. Con base en este criterio, a continuación, se detallarán algunos aspectos relacionados con las microalgas utilizadas.

3.1 CEPA MICROALGAL

Las necesidades nutricionales de elementos como calcio, magnesio, sodio, cloruros, y de oligoelementos como cobre, cobalto o manganeso, dependen de la especie a utilizar.¹⁰³

Pero teniendo en cuenta su capacidad para la fijación de CO₂¹⁰⁴ la cepa escogida fue *Chlorella vulgaris*, alga unicelular fotoautótrofa perteneciente al género Chlorophyta, su forma es esférica con un diámetro que va de los 2 a 10µm; es de color verde por su alto contenido de clorofila, no presenta flagelo, y una de sus principales características es su acelerada reproducción y crecimiento. Su composición química es: 51-58% proteína, 12-17% carbohidratos, 14- 22% lípidos, porcentajes presentados en materia seca.¹⁰⁵

Se han realizado diversos estudios con esta cepa; uno de ellos estudió el efecto de la inyección continua de CO₂ sobre la productividad de biomasa de la *Chlorella vulgaris* a escala laboratorio, donde se estableció que la cantidad de CO₂ influye en el crecimiento de la microalga y que, al disminuir la concentración de nitrógeno, se puede obtener una mayor productividad de biomasa. Se puede mejorar la tasa de fijación regulando la cantidad de carbono y nitrógeno presente en el medio; a bajas concentraciones de nitrógeno y altas de carbono, se puede mejorar hasta dos veces

¹⁰³ FERNANDEZ, J. Cultivo de microalgas: laboratorio y gran escala. Ingeniería de Procesos aplicada a la biotecnología. [en línea]. Sevilla. 2014. [Consultado: 11 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-2-cultivo-de-microalgas.html>

¹⁰⁴ BARAJAS, A; GODOY, C; MONROY, J y KAFAROV, V. Mejoramiento del secuestro de CO₂ POR *Chlorella vulgaris* en FBR a escala laboratorio. Revista ION: 2012. Vol.15. Nro.2. ISSN 0120-100X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3420/342030286005.pdf>

¹⁰⁵ WANG, L., MIN, M., LI, Y. y COL. Cultivo de algas verdes *Chlorella sp.* en diferentes aguas residuales de la planta municipal de tratamiento de aguas residuales. *Appl Biochem Biotechnol*: 2010. Vol.162, pp 1174-1186 (2010). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8866-7>

la productividad de biomasa total.¹⁰⁶ En otros estudios, se analizó la captura de CO₂ por *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* bajo condiciones controladas en fotobiorreactores, determinando que la *C. vulgaris* obtuvo la mayor eficiencia en cuanto a crecimiento celular, producción de biomasa, biofijación y porcentaje de remoción de CO₂. La biofijación de CO₂ más alta se dio donde se dosificó el CO₂ adicional, ya que la tasa de biofijación está relacionada con la biomasa y en estos tratamientos se obtuvo una mayor cantidad.¹⁰⁷

Esta microalga se encuentra normalmente en los cuerpos de agua dulce y fue suministrada por el grupo de investigación GRESIA de la Universidad Antonio Nariño, la cual fue aislada de una laguna en la sede Usme de dicha universidad. Esta microalga ha sido una de las especies más estudiadas en investigaciones por la producción de biomasa y por la versatilidad de sus cultivos.

La biomasa producida por las microalgas es de gran calidad, por lo que tienen aplicaciones diversas como: suplemento dietario, cosméticos, alimento animal, producción de energía, obtención de lípidos, remoción de sustancias nocivas para los ecosistemas, producción de biocombustibles, elaboración de productos químico-farmacéuticos, tratamiento de aguas residuales, entre otros.¹⁰⁸

3.2 MEDIO DE CULTIVO

Como se mencionó previamente, después del carbono, el nitrógeno es el nutriente más importante para el crecimiento de las microalgas, además del fósforo, esencial para la transferencia de energía y formación de ácidos nucleicos y “cuya deficiencia es una de las principales limitantes del crecimiento de estos microorganismos”¹⁰⁹

Una de las principales fuentes de estos nutrientes son los fertilizantes, pero se descartó su uso debido al efecto negativo que generaba en el medio ambiente, por lo que fue necesario encontrar una nueva fuente de nutrientes para el crecimiento de las microalgas. De acuerdo con la búsqueda del grupo GRESIA, se encontró que

¹⁰⁶ BARAJAS, GODOY, MONROY, y KAFAROV. Op. Cit.

¹⁰⁷ VERGARA, L. Captura de CO₂ por *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* bajo condiciones controladas en fotobiorreactores. [en línea]. 2019. Proyecto de grado [Consultado: 6 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/27921/%20%09lvergarap.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

¹⁰⁸ HERGUEDAS, Ana. & GARCIA, E. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. ITAGRA: 2012. Centro Tecnológico agrario y agroalimentario. ISBN: 978-84-931891-5-0. Disponible: <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>

¹⁰⁹ PÉREZ, A y LABBÉ, J. Op. Cit, p.160

esa nueva fuente sería la orina humana, ya que en algunas investigaciones ha sido considerada como alternativa para otros recursos de nutrientes convencionales gracias a la cantidad de macro y micro nutrientes que contiene¹¹⁰, evidenciándose en este proyecto donde se aplicó un cultivo de microalgas para recuperar los nutrientes de la orina humana. El contenido de nitrógeno en la orina puede variar en una concentración entre 3 y 7 gramos de N por litro de orina.¹¹¹

En otro de los proyectos se utilizó la orina humana como una alternativa al fertilizante químico y a las aguas residuales municipales para el cultivo de microalgas, para producir biodiesel de tercera generación¹¹² donde se concluye que en todos los experimentos la orina humana diluida funcionó demostrando que era compatible con el crecimiento y la producción de algas. En la **tabla 7** se pueden observar algunos parámetros y la concentración que aportan al utilizar la orina, como fuente de nutrientes para el crecimiento de las microalgas. En la orina, el 85% del nitrógeno se encuentra en forma de urea y el 5% en forma de amoníaco.

Tabla 7. Composición de la orina humana.

Parámetros	Concentración (g/m ³)
pH	6,2
N _{tot}	8830
P _{tot}	800-2000
K	2737
S	1315
Na	3450
Ca	233
Mg	119
Mn	0,019

FUENTE: SOROOSH, H. Considering human urine as nutrients resource for cultivation of microalgae for biodiesel production in photoautotrophic metabolism. Tesis maestría. 2011.

¹¹⁰ TUANTET, Kanjana. Microalgae cultivation for nutrient recovery from human urine [en línea]. Título de doctor. Wageningen, Países Bajos: Universidad de Wageningen. 2015. [Consultado: 6 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/337297>

¹¹¹ Ibid.

¹¹² SOROOSH, H. Considering human urine as nutrients resource for cultivation of microalgae *Scenedesmus quadricauda* for biodiesel production in photoautotrophic metabolism. Tesis maestría [en línea]. 2011. [Consultado: 3 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/1735>

La orina utilizada es proveniente de hombres, debido a la practicidad de su obtención y teniendo en cuenta que en la orina de las mujeres existen factores externos que pueden incidir en la composición de la orina, como el uso de hormonas o métodos anticonceptivos.

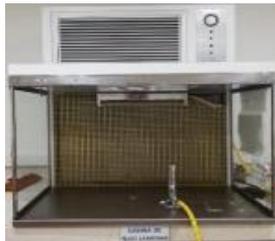
El tratamiento que se le hace a esta consiste en esterilizarla dos veces en la autoclave a una presión entre 17 y 21 psi y una temperatura de 121°C, condiciones que conllevan a la muerte de los microorganismos. Posteriormente se almacena en un contenedor donde permanece disponible para su uso.

Para la preparación del medio de cultivo se utilizaron 8 mL de orina y se le adicionan 17g de agar, ambas proporciones corresponden a un volumen de 1 Litro de agua, preparación establecida en las instrucciones de uso del medio. Pero debido a que se hace más fácil trabajar con volúmenes pequeños, la preparación del medio se realizó en recipientes ambar de vidrio de 250mL, en los que se le agregó 2 mL de orina y 4,25g de agar, dicha preparación debe agitarse vigorosamente para asegurar la disolución completa del agar en el medio y se debe pasar por la autoclave (121°C) para su adecuada esterilización, ya que al trabajar con microorganismos se debe garantizar un ambiente libre de bacterias.

3.3. EQUIPOS UTILIZADOS PARA EL CRECIMIENTO DEL CULTIVO

Para el cultivo de las microalgas se utilizó una serie de equipos que además de proporcionar las condiciones de inocuidad necesarias, permitieron el análisis del crecimiento de las microalgas y se describen a continuación:

Cuadro 3. Descripción de los equipos de laboratorio utilizados.

Equipo	Características	Función	Imagen
Autoclave	<p>Sistema hermético que opera a 121°C y 15lb de presión, formando vapor de agua, que conlleva a la muerte de los microorganismos y la destrucción de las esporas en su interior.</p> <p>Marca: All American Modelo: 50X-120</p>	<p>Se utilizó para esterilizar el material y los medios de cultivo para el proceso.</p>	 <p>Fuente: propia.</p>
Balanza analítica	<p>Se utiliza principalmente para medir pequeñas masas, precisión de lectura de 0,1µg a 0,1mg.</p> <p>Marca: BOECO Germany Modelo: BBL52</p>	<p>Se utilizó para medir el peso de los reactivos y cuantificación del peso seco de la biomasa.</p>	 <p>Fuente: propia.</p>
Cabina de flujo laminar	<p>Permite mantener libre de polvo e impurezas el espacio interior del área de trabajo, además de la esterilización debida a su luz ultravioleta.</p> <p>Marca: Purificación u Análisis de Fluidos LTDA</p>	<p>Empleado para manipular los microorganismos y medios de cultivo.</p>	 <p>Fuente: propia.</p>
Espectrofotómetro	<p>Instrumento usado en el análisis químico que mide la absorbancia de una muestra en los espectros de luz ultravioleta y visible.</p> <p>Marca: Genesys 20. Modelo: Thermo</p>	<p>Empleado para monitorear el crecimiento microbiano por medio de la turbidez o densidad óptica del cultivo.</p>	 <p>Fuente: propia.</p>
Microscopio	<p>Instrumento óptico de gran importancia para la observación e identificación de los microorganismos.</p> <p>Marca: Leica Modelo: MD500</p>	<p>Utilizado para observar la morfología microscópica de los microorganismos</p>	 <p>Fuente: propia.</p>

Cuadro 3. (Continuación)

Equipo	Características	Función	Imagen
pH-metro	Instrumento que mide la actividad del ion hidrógeno en soluciones acuosas, indicando su grado de acidez o alcalinidad. Marca: HANNA Modelo: HI2210	Se empleó para el medir el pH del medio de cultivo a lo largo del tiempo.	 Fuente: propia.
Cámara Neubauer	Instrumento utilizado para realizar el recuento de células en medio líquido. Es una placa gruesa de vidrio que se adapta al microscopio introduciendo a contar.	Se empleó para determinar el conteo celular del cultivo de los fotobiorreactores.	 Fuente: propia

Fuente: elaboración propia, con base en GRESIA. Universidad Antonio Nariño. 2019.

3.4 MÉTODOS DE ESTRIADO EMPLEADOS

Estos métodos son necesarios para la obtención de microalgas y luego de su crecimiento en las cajas de petri, serán utilizadas para inocular los fotobiorreactores y realizar los ensayos con las inyecciones del gas de combustión. El cultivo de las microalgas se realizó en cajas de petri, previamente esterilizadas en la autoclave, en las que se adicionaron 25mL del medio de cultivo en estado líquido, para esto, fue llevado al microondas por 10 minutos con una potencia de 30 Watts para prevenir su posible derrame.

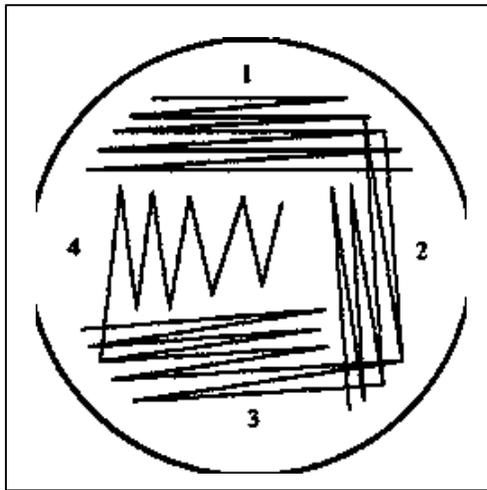
Se adicionó un antibiótico compuesto por 25mg/mL de cloranfenicol¹¹³, para prevenir el crecimiento de bacterias en el cultivo, se esperó hasta que el medio alcanzara una temperatura tolerable, -teniendo en cuenta que las altas temperaturas desnaturalizan el antibiótico-, y se agregaron 25µL a los 25mL de medio líquido. Finalmente, se sirvió en la caja y se dejó solidificar, para posteriormente hacer el rayado correspondiente para obtener las células requeridas.

Si se quieren obtener colonias específicas y aisladas para su clasificación y estudio microbiológico, se debe realizar un rayado por agotamiento (**figura 13**), que consiste

¹¹³ PROTOCOLS.IO. Cómo hacer una solución madre de cloranfenicol. 2014. dx.doi.org/10.17504/protocols.io.ci5ug5 [en línea]. Disponible en: <https://www.protocols.io/view/How-to-make-a-25-50-mg-ml-Chloramphenicol-Stock-So-j93ug5>

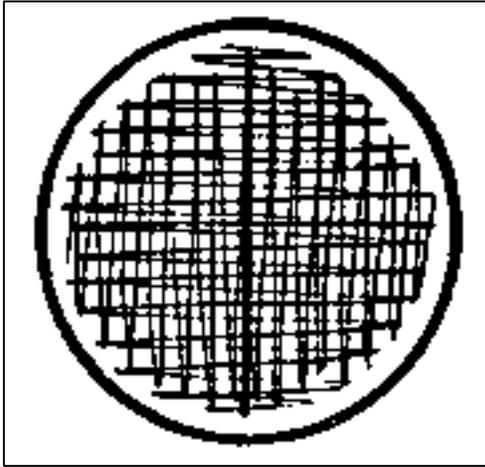
en hacer 4 zigzags a lo largo de la caja, cuya línea inicial parte del final del zigzag anterior; pero si lo que se desea es obtener células numerosas sin importar el tipo de colonia, como es el caso del proyecto, se debe hacer un rayado masivo, que consiste en hacer líneas cercanas entre sí por toda la caja como evidencia la **figura 14**. Finalmente, las cajas son marcadas y llevadas a la incubadora, donde crecerán gracias a la temperatura y suministro de la luz, este proceso toma alrededor de 4 días. Transcurrido este tiempo pueden ser almacenadas en una nevera o inoculadas en los fotobiorreactores.

Figura 13. Aislamiento por agotamiento



Fuente: FRANCO, M; GARCIA, C y Osorio, R. Técnicas y métodos del estriado en cajas de petri [en línea]. 2014. Disponible en: <http://microbiologia3bequipo5.blogspot.com/2014/10/tecnicas-y-metodos-de-estriado-en-caja.html>

Figura 14. Rayado masivo



Fuente: FRANCO, M; GARCIA, C y Osorio, R. Técnicas y métodos del estriado en cajas de petri [en línea]. 2014. Disponible en: <http://microbiologia3bequipo5.blogspot.com/2014/10/tecnicas-y-metodos-de-estriado-en-caja.html>

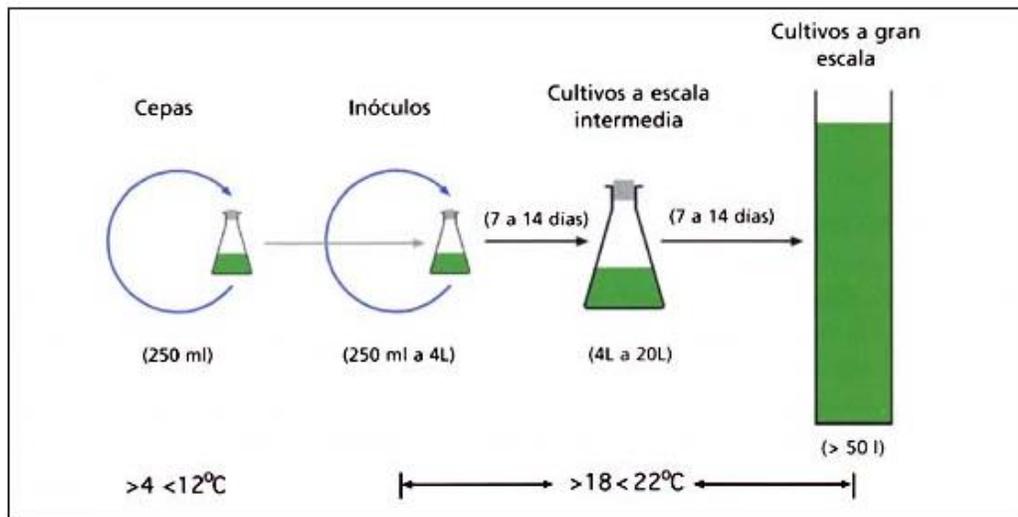
3.5 INOCULACIÓN EN EL FOTOBIORREACTOR

Las cepas crecidas en las cajas de petri durante 96 horas, con iluminación de 2000 luxes aproximadamente y una temperatura adecuada de 26°C, eran empleadas para inocular los FBR. A las cajas no se les realizó ningún tratamiento aparte de los explicados anteriormente.

Para el proceso de inoculación de los FBR se utilizaron entre 8 y 10 perlas de vidrio previamente esterilizadas en la autoclave y se añadieron en las cajas de petri, con 6mL aproximadamente de agua destilada estéril. Se cerraron y se agitaron de forma rotatoria para remover la biomasa. Finalmente, las perlas de vidrio se disponen en un recipiente cubierto por una gasa utilizada como filtro, para separar la biomasa microalgal de las perlas para posteriormente inocular los FBR. Este método es ampliamente utilizado, ya que la geometría de las perlas evita el daño en la estructura celular de los microorganismos.¹¹⁴

¹¹⁴ HE, Lian; SUBRAMANIAN, Venkat & TANG, Yinjie. Experimental análisis and model-based optimization of microalgae growth in photo-bioreactors using flue gas. ELSEVIER: 2012. Washington University. Vol.41, pp.131-138. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.02.025

Figura 15. Etapas en la producción de algas.



Fuente: FAO. Funcionamiento del criadero: cultivo de algas. s.f. [en línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/y5720s/y5720s07.htm>

Por otro lado, se tenían los FBR lavados y estériles con el medio de cultivo listo para su inoculación; se llevaban a la cabina de flujo laminar, para evitar la contaminación de estos, se abrían con precaución, evitando posibles derrames y se agregaba una muestra de 5 mL a cada uno, se sellaban adecuadamente y posteriormente se disponían en la incubadora descrita en el numeral 3.6, la cual permitía el control de las condiciones necesarias para el crecimiento del cultivo.

3.5 CONSTRUCCIÓN DEL FOTOBIORREACTOR

Los fotobiorreactores son sistemas especializados en el cultivo de microorganismos debido al control que se le puede dar a los parámetros necesarios para el crecimiento y adaptación de las microalgas, como luz, temperatura, agitación y nutrientes. Para este proyecto, el tipo de fotobiorreactor empleado fue uno de tanque agitado, debido a que representa la opción más económica y fácil de recrear, siguiendo estas premisas, se optó igualmente por un método mecánico de agitación.

Se realizó una modificación a la geometría del FBR acoplado un brazo externo para la determinación indirecta del crecimiento del cultivo a través de un sensor fotoeléctrico, adicionalmente se realizaron 3 FBR para tener réplicas del comportamiento del cultivo.

3.5.1 Materiales y dimensionamiento. Los materiales utilizados para la construcción de los FBR están relacionados tanto con los parámetros necesarios de operación como con los requerimientos de la investigación. Con base en esto, las principales características que se deben tener en cuenta a la hora de escoger los materiales a utilizar en el proyecto son¹¹⁵:

- **Transparencia:** el recipiente debe permitir la visualización y seguimiento del cultivo a simple vista, además esta característica permite el paso efectivo de la luz, ya que, a diferencia de diseños anteriores, este FBR no tendrá ningún suministro lumínico adherido precisamente a él.
- **Resistencia a la esterilización:** teniendo en cuenta que se deben trabajar bajo condiciones estériles para evitar la contaminación por bacterias u hongos, el material escogido debe resistir altas temperaturas.
- **Hermeticidad:** el recipiente debe presentar un sello hermético, ya que, al trabajar con gases, debe evitarse la posible presencia de fugas.
- **Durabilidad,** el material del recipiente debe tener alta resistencia al desgaste, pues retendrá a las microalgas por un tiempo considerable, suministrando los nutrientes necesarios.
- **Fácil mantenimiento (limpieza:** ya que después de que el cultivo alcance su máximo crecimiento, el FBR debe prepararse para la próxima inoculación, por tanto, la limpieza de este debe ser fácil y rápida.
- **Bajo costo:** uno de los principales objetivos en recrear un FBR de bajo costo, con materiales fáciles de adquirir pero que cumpla con todas las condiciones mencionadas para el crecimiento y adaptación de las microalgas.

A partir de estos requerimientos, los materiales escogidos para el montaje del FBR fueron:

3.5.1.1 Recipiente. Para el cuerpo de los FBR se utilizaron frascos de polipropileno (PP) de 250 mL, utilizados comercialmente como contenedores de alimentos (**figura 16**) debido al sello hermético presente en la tapa de los mismos, además de esta característica se tuvieron en cuenta otras variables como el punto de fusión del PP

¹¹⁵ MORENO, E y VANEGAS, D. Diseño de un biorreactor esterilizable y de bajo costo para el crecimiento de microorganismos. [Tesis]. Universidad distrital Francisco José de Caldas [en línea] Bogotá. 2017. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/12989/1/VanegasGutierrezDanielFernando2018.pdf>

(160°C¹¹⁶), el cual le permite su correcta esterilización, y la fácil manipulación que tiene el plástico frente a otros materiales como el vidrio, para la elaboración de orificios en los que se acoplaron el sistema de seguimiento óptico y el suministro de CO₂.

Figura 16. Recipiente empleado para el FBR



Fuente: elaboración propia.

3.5.2 Sistema de seguimiento óptico. El crecimiento de las microalgas se cuantificará de acuerdo con la densidad óptica del medio, para esto se utilizaron tubos de acero inoxidable (1/8) de 6.4 mm de diámetro y 3 cm de largo, y empaques de caucho siliconado, en forma de codo, los cuales, además de su punto de fusión de 200°C ideal para su esterilización, brindan además un sello hermético al acople de estos tubos.

Entre estos empaques, se dispuso un tubo de vidrio de 12.9 mm de diámetro y 5 cm de largo, por medio del cual se dio la lectura de la densidad óptica del medio, (**figura 17**) en este tubo se ajustaron unas piezas diseñadas a medida e impresas en 3D en las que se instaló un sensor fotoeléctrico compuesto por una fotorresistencia y una luz led roja de 5mm (**figura 18**), la cual, debido a su contraste con el medio (verde)

¹¹⁶ BARREDA, M.; IAIANI, C.; SOTA, J. D. Hormigón reforzado con fibras de polipropileno: tramo experimental de un pavimento de hormigón. *IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*: 2000, [en línea] p. 1145-1150. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/c233/3e10857e34dedf5606a5ba2d9c6b5ee9efbe.pdf>

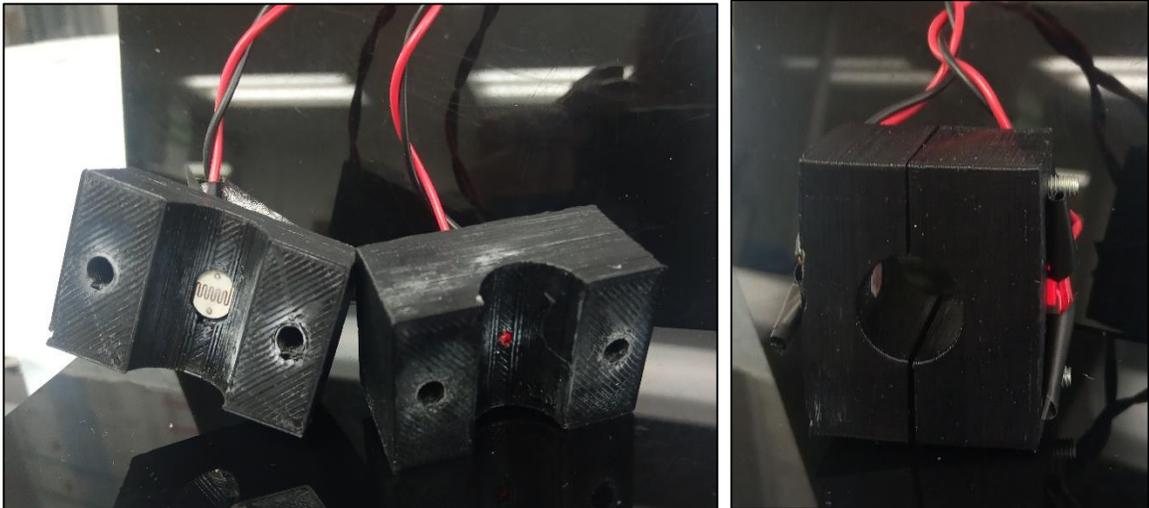
y las longitudes de onda que emite, proporcionó las lecturas necesarias de la absorbancia de esta luz en el medio.¹¹⁷

Figura 17. Sistema de muestreo de densidad óptica.



Fuente: elaboración propia, realizado en Blender® v2.79

Figura 18. Sensor fotoeléctrico utilizado

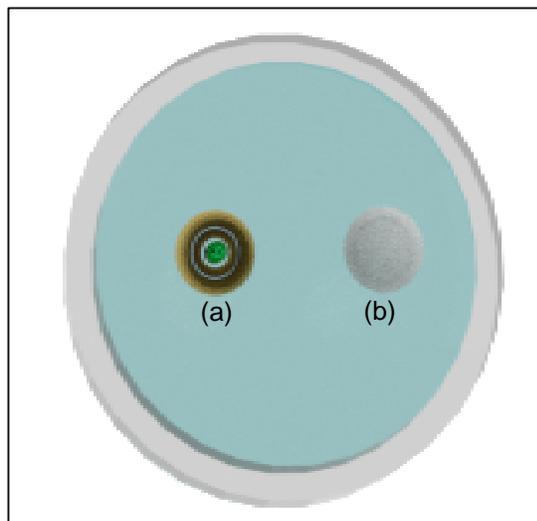


Fuente: elaboración propia.

¹¹⁷ MARROQUÍN, Jorge. Desarrollo de biorreactores controlados aplicables al estudio de cultivo de microorganismos de interés comercial. Bogotá D.C: 2018. [Tesis de grado]. Universidad distrital Francisco José de Caldas.

3.5.1.3. Suministro de CO₂. Debido a que el CO₂ proviene de un proceso de combustión, fue necesario acoplar elementos que permitieran tanto el suministro de CO₂, como la reserva del medio debida a la inyección de este gas en un sistema hermético. Para esto, se abrieron dos orificios de 9.9 mm, con una broca de 3/8 en la tapa del recipiente. En uno de ellos se introdujo un empaque en forma de tapón **(figura 19)** por donde se inyectó el gas de combustión a través de una jeringa, y en el otro se adecuó un reservorio para contener el volumen del medio desplazado tras la inyección del gas **(figura 20)**, este se diseñó con un molde de resina poliéster, que sirvió para el acople del reservorio y del tubo de acero inoxidable (1/8) por el que fluirá el medio. Se optó por utilizar una jeringa, como reservorio, pues permite el seguimiento del volumen desplazado.

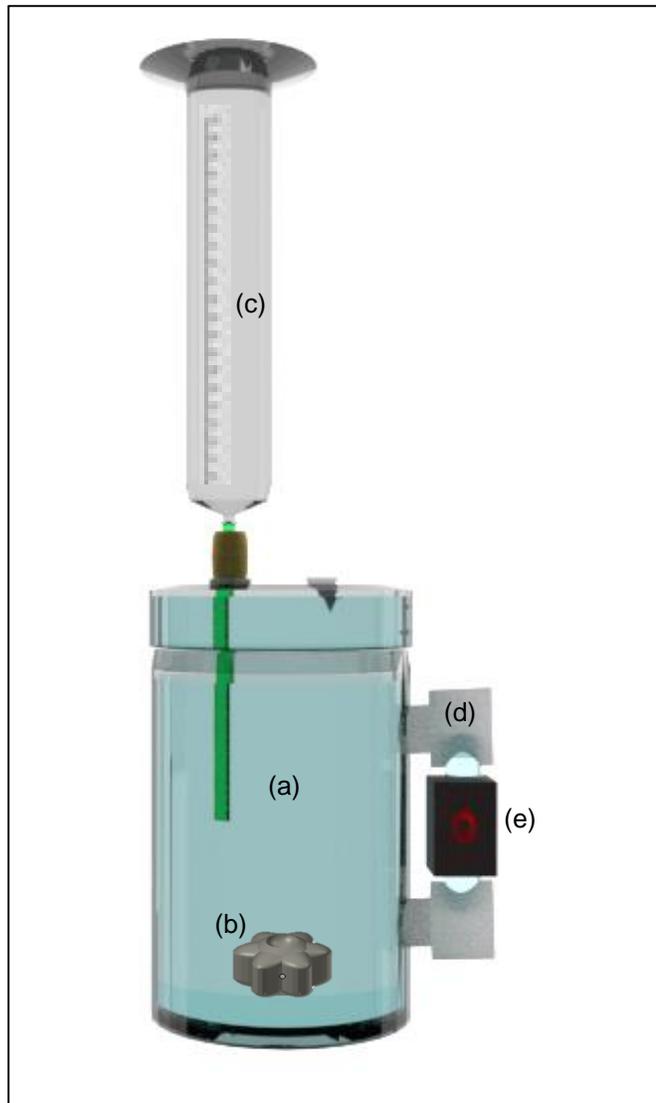
Figura 19. Sistema de inyección.



Fuente: elaboración propia, realizado en Blender® v2.79

Partes. (a) Acople para el reservorio;
(b) Tapón de caucho para el suministro de gas de combustión al FBR.

Figura 20. Sistema de seguimiento óptico e inyección del gas en el FBR.

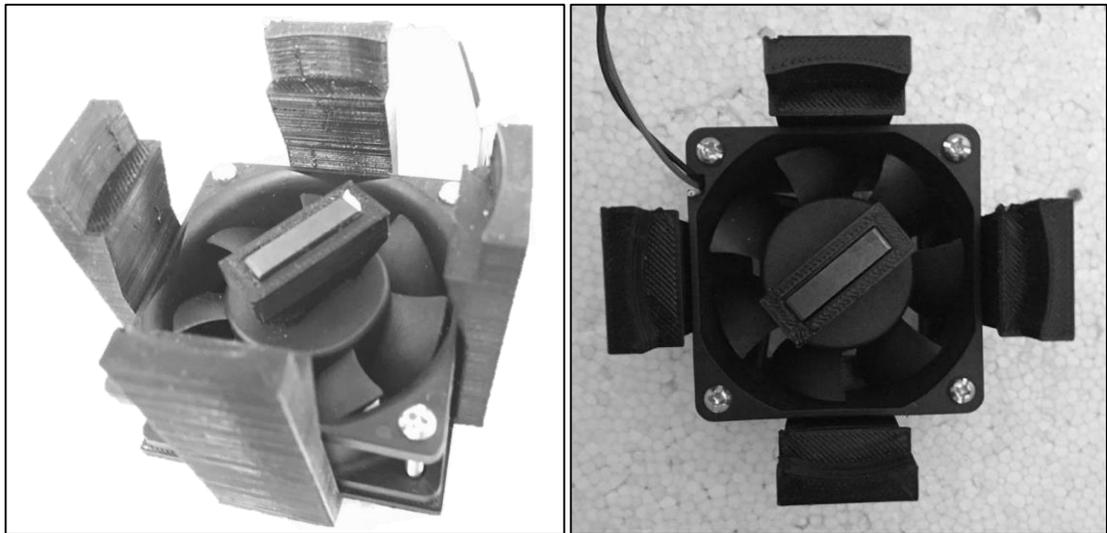


Fuente: elaboración propia, realizado en Blender® v2.79
Partes. (a) Fotobiorreactor; (b) Agitador magnético;
(c) Reservorio; (d) Sistema de muestra; (e) Sensor fotoeléctrico.

3.5.3 Sistema de agitación. Como se mencionó a lo largo del documento, la agitación es uno de los factores claves para acelerar el proceso y mejorar la transferencia de masa entre las moléculas presentes en las distintas fases del medio. Teniendo en cuenta los costos energéticos y de instalación, se optó por preferir una agitación mecánica frente a la agitación por burbujeo, teniendo en cuenta además, que este tipo de agitación dificulta el seguimiento preciso del CO₂ debido a la inyección de aire que requiere este método.

Para el sistema de agitación se diseñó e imprimió un soporte para sostener un ventilador de (4x4) cm, como muestra la **figura 21**. Sobre este, se acopló un soporte para mantener un imán que, al entrar en contacto con otro imán dispuesto en el agitador, por efectos de la rotación del ventilador y el magnetismo entre estos, se generará la agitación del cultivo.

Figura 21. Sistema de agitación diseñado.



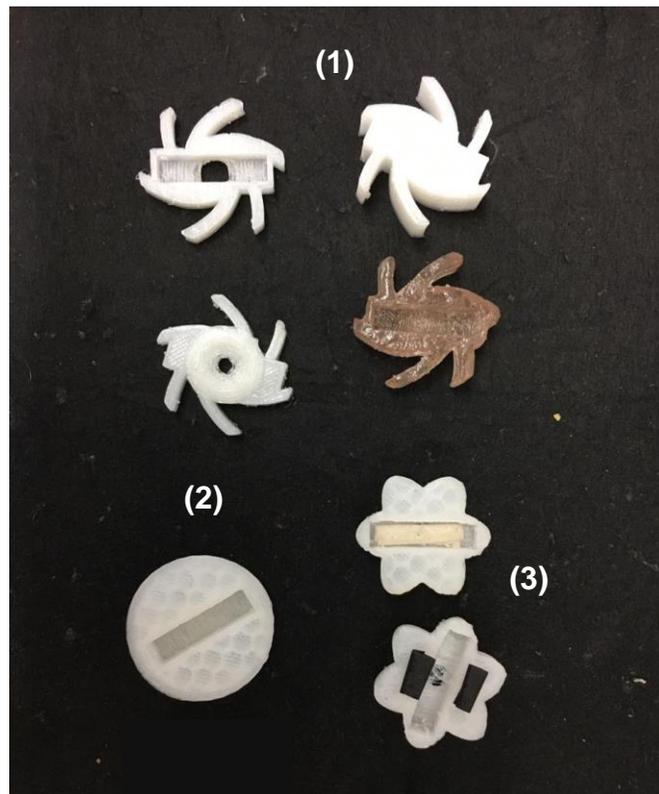
Fuente: elaboración propia.

Para el diseño del impulsor, se probaron distintas geometrías, tamaños y materiales (**figura 22**), hasta encontrar el adecuado para la agitación de las microalgas. La primera geometría utilizada (1), pese a ser la más común en agitadores, presentó la misma problemática que se da en las turbinas, descrita en el numeral 1.5.1.6, ocasionando la incrustación de los microorganismos en sus paredes, además esta geometría puede llegar a generar la fricción suficiente para romper las estructuras celulares de las microalgas. Aunque cabe aclarar que la cepa utilizada es

relativamente resistente al esfuerzo mecánico.¹¹⁸ Por otro lado, aunque la segunda (2) representa el diseño más aerodinámico, no lograba una correcta homogenización del medio, pues ocasionaba tan solo un remolino en la parte inferior del FBR y sedimentaciones en algunas partes del mismo.

Finalmente, se optó por un diseño que incluyera las características benéficas de ambas geometrías previas, este consta de seis puntas redondeadas en forma de flor (3), cuya forma permite una agitación adecuada y evita a su vez el daño en la pared celular de las microalgas. Adicionalmente se imprimió el diseño en 3D para hacerlo posteriormente en resina poliéster, con el fin de permitir la adecuada esterilización del nuevo diseño.

Figura 22. Geometrías empleadas para los agitadores.



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se realizó una prueba para comprobar que este impulsor fuera capaz de homogenizar todo el medio, incluyendo el contenido en el codo lateral.

¹¹⁸ HE, SUBRAMANIAN & TANG. Op. Cit, p.132.

Para esto, se dispuso una solución de agua con unas gotas de anilina en uno de los FBR y se agitó. Cinco minutos después, el codo tomó la misma coloración del resto del FBR (**anexo B**) demostrando que efectivamente el impulsor utilizado lograba la adecuada homogenización del cultivo, hecho que evidencia además que el método utilizado para el seguimiento óptico, es apto para la determinación del crecimiento del cultivo.

Se debe tener en cuenta que el tiempo de duplicación de las microalgas es de aproximadamente un día, por lo que la lectura del crecimiento debe realizarse a partir del segundo día, verificando que el codo presente la misma tonalidad del FBR.

Con la puesta en marcha del sistema de agitación, evidenciamos que la velocidad de agitación es función del crecimiento de las microalgas, pues un aumento en la concentración celular del medio dificulta progresivamente la agitación, hecho que se soluciona con un aumento progresivo en la velocidad de agitación. Para controlar esto, fue necesario el uso de potenciómetros, los cuales permitieron un control manual de la velocidad de agitación a lo largo del proceso, y que para este caso fue de 185 rpm en la fase inicial, hasta 285 rpm.

Teniendo en cuenta que el control de la agitación se dio a partir de los valores registrados en una pantalla y considerando los demás parámetros a controlar para el crecimiento y desarrollo de las microalgas, se hizo necesario el uso de una incubadora, cuyos materiales y metodología de instalación se describirán a continuación.

3.6 CONSTRUCCIÓN DE LA INCUBADORA

Una incubadora es un equipo sellado que permite el control de los parámetros necesarios para el crecimiento y reproducción de un cultivo de microorganismos. Los materiales de esta dependen de los requerimientos de las especies en su interior, para este caso, el material utilizado en su construcción fue una caja de poliestireno expandido (ICOPOR), debido a que este es un aislante térmico, que permite el control de la temperatura e iluminación, además de su fácil manipulación para hacer cortes y acoplar partes.

Sus dimensiones son: 34cm de alto, 40 cm de ancho y 34,2 cm de profundidad, ideales para la distribución de los tres reactores en su interior y de los elementos de control (**figura 23**), los cuales son:

Figura 23. Incubadora



Fuente: elaboración propia.

3.6.1 Iluminación. Es uno de los parámetros determinantes para mantener la actividad fotosintética de las microalgas, las cuales han demostrado una buena actividad bajo intensidades lumínicas entre 1000-1250 lux aproximadamente¹¹⁹. Para esto, se dispuso una cinta de 5m de luces LED (light-emitting diode) alrededor de la pared interna de la caja (a), a 6 cm de la parte inferior de esta, como se ve en la **figura 24**, con el fin de suministrar la luz necesaria al área en la que se encuentran los reactores. Para verificar la intensidad de la luz suministrada, se realizaron 15 mediciones con un luxómetro, en distintas zonas a lo largo del eje de cada reactor y se promediaron los datos (**anexo C**), obteniendo finalmente una intensidad de 1050 lux suministrados a la incubadora.

¹¹⁹ GONZALES, A. Op. Cit, p.5.

Una ventaja que representa la instalación de las luces en la incubadora y no alrededor del FBR como evidencian varios antecedentes¹²⁰, es que, las microalgas no tienen la necesidad de acumularse alrededor de las luces, hecho que interfiere en la adecuada homogenización del cultivo.

3.6.2 Temperatura y ventilación. La mayoría de las microalgas crecen entre los 10°C a 35°C según su especie, y han registrado una temperatura óptima entre los 22°C a 28°C. Con base en este rango y teniendo en cuenta los antecedentes experimentales del grupo GRESIA¹²¹, se decidió trabajar con una temperatura de 26,5°C; valor que se logró con el uso de un cordón de resistencia de 4m, ubicado en las paredes de la zona inferior de la incubadora (b), y que es activado por un controlador de temperatura, que recibe las lecturas de un sensor dispuesto en la parte superior de la incubadora (d), el cual envía las ordenes al controlador de desactivar la calefacción cuando la temperatura supere los 26°C y de activarla cuando este valor descienda.

Para mantener esta temperatura, además de la activación y desactivación del cordón de resistencia, fue necesario el acople de dos ventiladores de 5V, uno con el fin de suministrar la aireación necesaria a la incubadora, y el otro usado como extractor, ya que al ponerse al revés (c) permite la circulación del aire, garantizando un flujo efectivo en toda la incubadora.

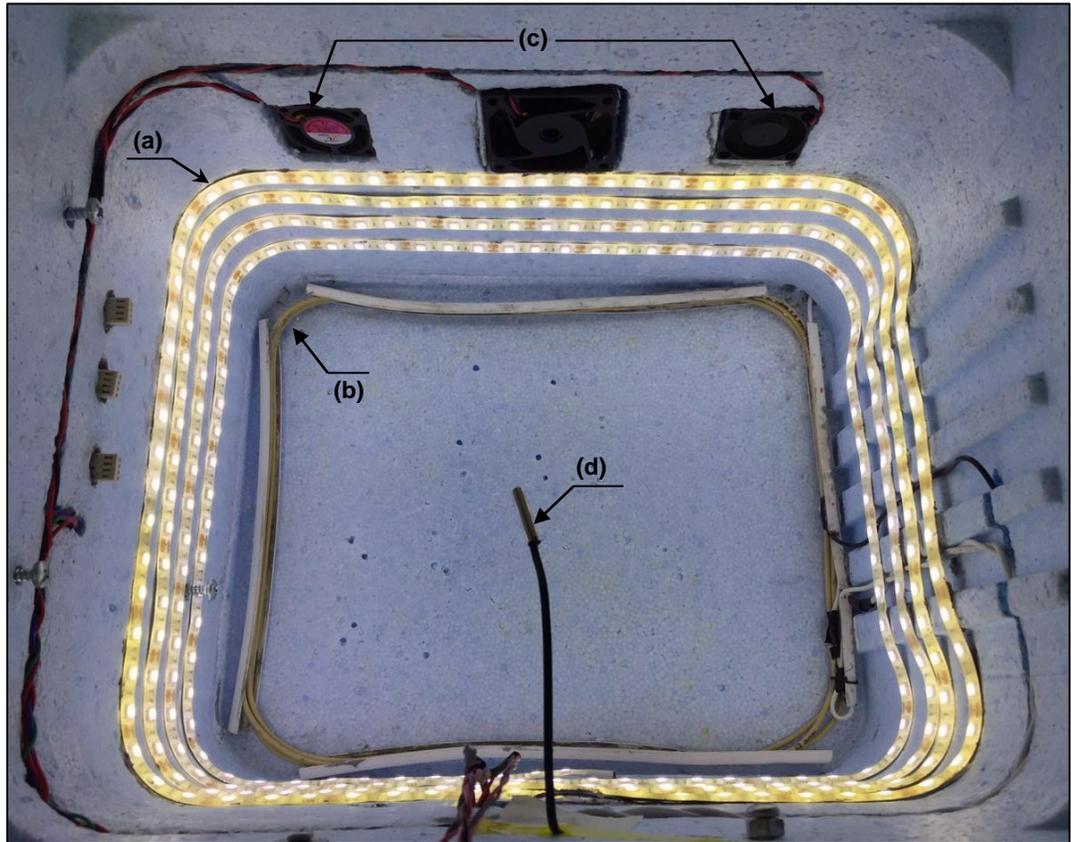
3.6.3 Velocidad de agitación. Como se mencionó en el numeral 3.5.2, la velocidad de agitación es controlada mediante potenciómetros cuyo valor puede verificarse en una pantalla, ubicada en el panel de control (**figura 25**), con el fin de ajustar manualmente la velocidad de agitación de los reactores de acuerdo con su fase de crecimiento.

En este panel se encuentran además los switches que activan cada controlador descrito anteriormente: (1) control de agitación, (2) control de temperatura, (3) control de iluminación, (4) y (5) control de los ventiladores.

¹²⁰ CARDOZO, Angie. Diseño y montaje de un sistema continuo de reactores FBR y UASB en serie para la producción de metano. Proyecto de grado. 2017. Universidad Antonio Nariño. p.27.

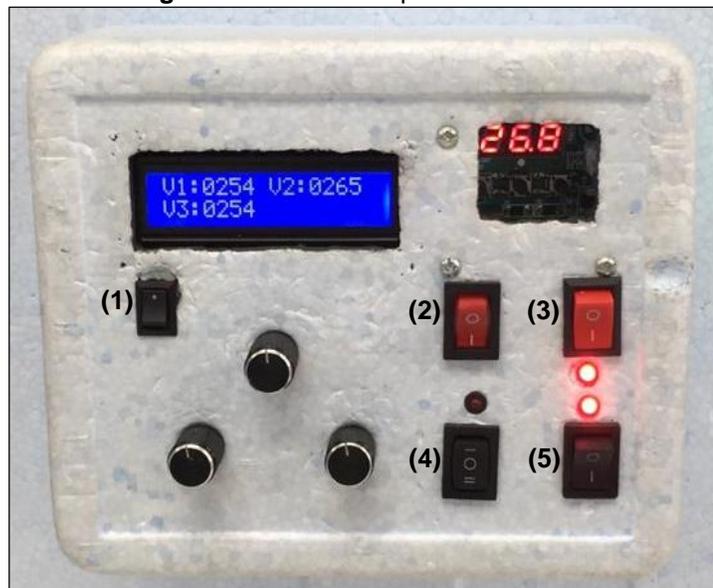
¹²¹ *Ibíd.*, p.56.

Figura 24. Ubicación del cordón de resistencia, ventilación e iluminación en la incubadora



Fuente: elaboración propia

Figura 25. Diseño del panel de control.



Fuente: elaboración propia.

3.6.4 Densidad celular. Tal como se describió en el numeral 3.5.2, se diseñó un sistema de seguimiento óptico mediante un sensor fotoeléctrico con el fin de determinar la densidad celular del cultivo a través de la medida de la intensidad de la luz que atraviesa el medio, sin afectar la esterilidad y evitando el muestreo del mismo.¹²²

Un led rojo de longitud de onda de 680nm aproximadamente emite radiación electromagnética atravesando el tubo de vidrio descrito en el numeral 3.5.2. Finalmente, un circuito electrónico da lectura del valor de la fotorresistencia que incide sobre la superficie, asignando un número entre 0 y 999, siendo 0 oscuridad total y 999 la máxima capacidad para la absorción de la luz.¹²³

La programación de estos sensores se realizó en Arduino®, se calibraron con el fin de estimar su comportamiento y se compararon las medidas de estos contra las medidas en un espectrofotómetro marca genesys 20, modelo thermo. Para las diferentes soluciones seriadas, las correlaciones establecidas entre los sensores de medida óptica con los valores del espectrofotómetro son lineales a una longitud de onda de 680nm y la lectura de absorbancia del cultivo con los sensores, se programó de modo que, al momento de la lectura las luces del cultivo se apagaran con el fin de obtener los datos para crear las curvas de crecimiento apropiadas.

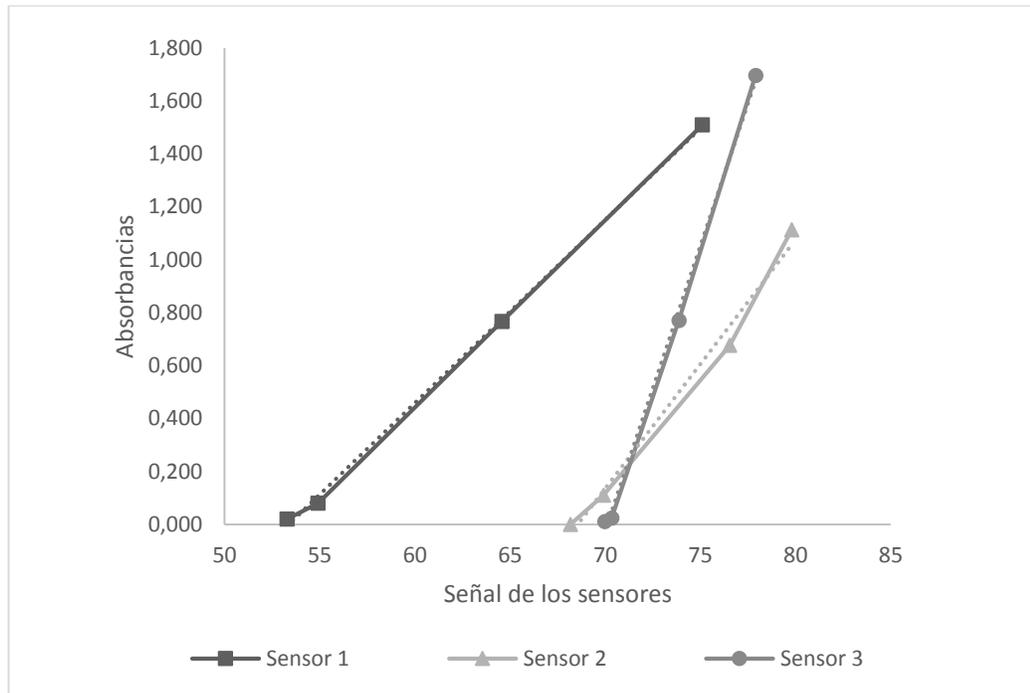
Se realizaron cinco diluciones seriadas de un cultivo concentrado, con medio de cultivo (agua destilada + orina). Las diluciones fueron del 100%, 50%, 25%, 13% y 6%. En cada una de estas, se leyeron los datos de los sensores proporcionados por el programa cada 5 minutos, durante 1 hora y 25 minutos, tomando 3 datos por cada dilución, con el fin de obtener los valores necesarios para traducir las señales emitidas por los sensores. Igualmente, cada 5 minutos se tomó una muestra de 300µL de las diluciones realizadas por cada reactor, para leer las absorbancias reales en el espectrofotómetro a 680nm.

Finalmente, se promediaron los 3 datos obtenidos tras cada dilución y se obtuvo la siguiente gráfica:

¹²² MARROQUÍN, Jorge. Desarrollo de biorreactores controlados aplicables al estudio de cultivo de microorganismos de interés comercial. Bogotá D.C: 2018. [Tesis de grado]. Universidad distrital Francisco José de Caldas.

¹²³ *Ibíd.*, p.36.

Gráfica 1. Curvas de calibración de los sensores.



Fuente: elaboración propia

Las ecuaciones de la recta para las señales proporcionadas por los sensores fueron:

Sensor 1: $y = 0,0692x - 3,695$ con $R^2 = 0,9990$

Sensor 2: $y = 0,094x - 6,4406$ con $R^2 = 0,9874$

Sensor 3: $y = 0,2154x - 15,102$ con $R^2 = 0,9978$

Mediante la ecuación de la recta (**ecuación 14**) fue posible determinar el valor real de la absorbancia equivalente a cada señal suministrada por los sensores.

Ecuación 14. Ecuación de la recta

$$y = mx + b$$

Donde;

y = absorbancia real

x = señal emitida por los sensores

Fuente: MORENO G; SERRANO J y PALACIOS J. Op. Cit, p.25.

Con los valores obtenidos tras el despeje de la ecuación anterior fue posible transformar las señales de los sensores en absorbancias, y comparar los valores de absorbancia teórico vs. los valores de absorbancia reales.

Para fines prácticos se realizó el procedimiento anterior, utilizando agua destilada como blanco, con el fin de comparar la desviación de los datos obtenidos (**ver anexo D**). Este procedimiento demostró que ambos valores son muy parecidos, por lo que, en caso de escasear el medio de cultivo, se podría usar agua destilada como blanco sin ningún problema.

3.7 ENTREGABLE FINAL DEL SISTEMA

Finalmente, el entregable correspondiente al montaje del FBR y de la incubadora se evidencian en el **anexo E**. Adicionalmente en **anexo F** se ilustró todo el procedimiento realizado en un diagrama de flujo.

4. EVALUACIÓN DEL GRADO DE BIOFIJACIÓN EN EL CULTIVO

Para la determinación del grado de biofijación de CO₂ alcanzado por las microalgas es necesario evaluar algunos factores que serán descritos a continuación:

4.1 CRECIMIENTO DE LAS MICROALGAS

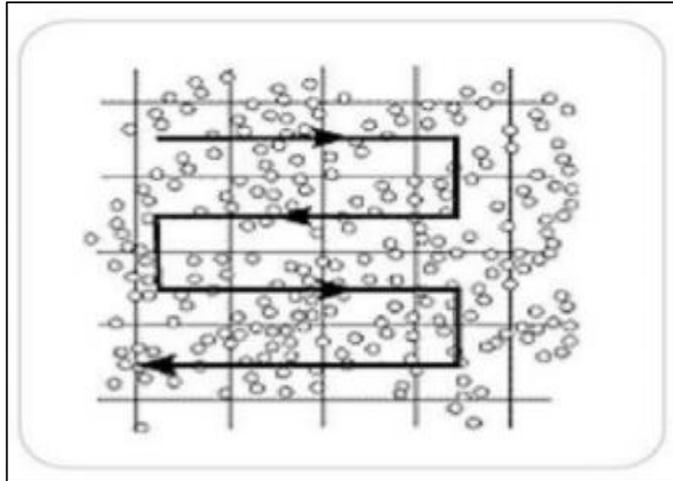
El crecimiento de las microalgas puede determinarse mediante diversas formas, como lo son: el conteo celular, y las curvas de crecimiento, el procedimiento para la realización de estos métodos se describe a continuación

4.1.1 Conteo celular. El conteo celular de microorganismos se llevó a cabo mediante una cámara Neubauer, durante 5 días para cada una de las cantidades inyectadas de gas a los FBR, con el fin de determinar cuál inyección del gas de combustión era el que mejor crecimiento registraba.

Inicialmente, se realiza la limpieza completa de la cámara Neubauer con etanol, y se seca con papel de arroz. Paso siguiente, se ubica en el microscopio, y se gradúa de tal forma que la cuadrícula de la cámara se vea completamente. Luego con una micropipeta, se agregan 20 µL de la muestra del FBR para realizar su conteo celular. Este se realizó en forma de zigzag tal como se muestra en la **figura 26** sin tener en cuenta las microalgas que se encuentran sobre las líneas que delimitan los cuadrantes, en el cuadrado central milimétrico el cual se divide en 25 grupos de 16 cuadrados pequeños, cada grupo separado por líneas triples¹²⁴ como se puede ver en la **figura 27**.

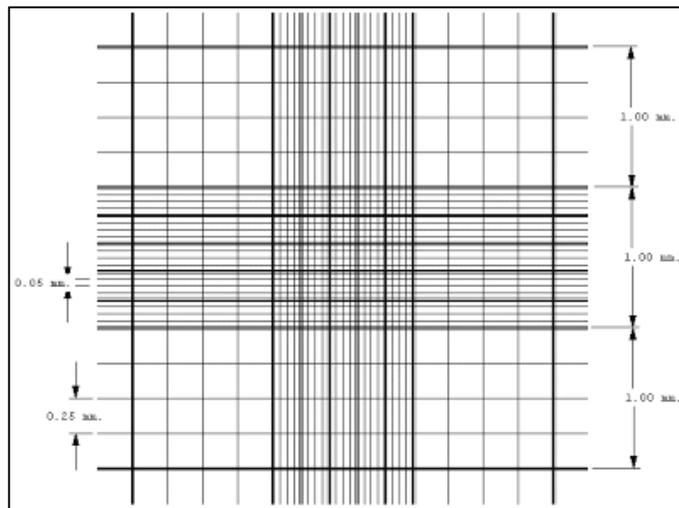
¹²⁴ PEDRAZA, M y PRADA, M. Evaluación de la biofijación de CO₂ y a partir de las microalgas bajo condiciones de fotobiorreactor a escala laboratorio. Tesis. 2018. p.59. [en línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6729/1/6131002-2018-1-IQ.pdf>

Figura 26. Conteo en zigzag



Fuente: BASTIDAS, Oscar. Conteo Celular Con Hematocítmetro. Disponible en: Celeromics. 2011. p. 4.

Figura 27. Cuadrícula de recuento celular



Fuente: Conteo de células en cámara Neubauer. [en línea]. 2009. Disponible en: <http://metodoslabideanellydiazpuentes.blogspot.com/2009/11/conteo-de-celulas-en-camara-de-neubauer.html>

En caso de que los FBR aún se encuentren en crecimiento, se toma una muestra de cada uno con una micropipeta y se agrega en la cámara Neubauer para realizar su conteo; pero si el FBR ya se encuentra crecido, se dificultará el conteo celular debido a la concentración de la muestra. Por esta razón, la muestra es diluida con

el medio de cultivo (agua y orina) con el fin de observar de manera clara y bien definidas a las microalgas en el microscopio.

El cálculo del número de células por ml se determinó mediante la **ecuación 13**, donde el factor de dilución se tiene en cuenta sólo en caso de que se haya dificultado el conteo y se haya realizado la dilución.

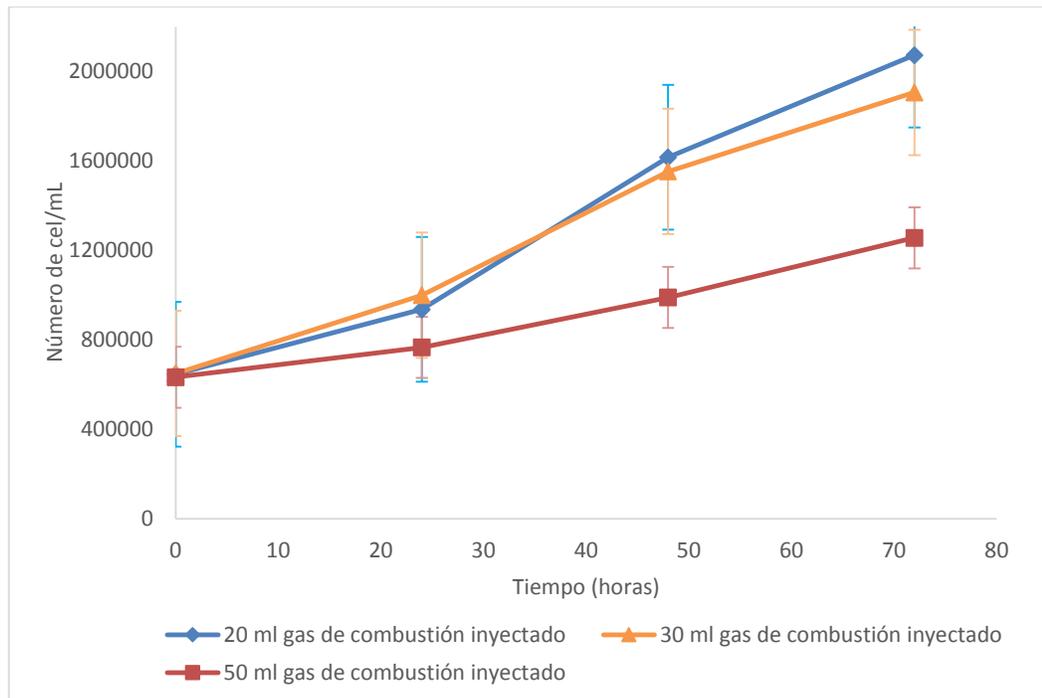
Ecuación 15. Cálculo del número de células

$$\frac{\text{Células}}{\text{mL}} = \frac{\text{número de células} * \text{factor de dilución}}{\text{volumen} * \frac{\text{cuadrantes contados}}{\text{cuadrantes totales}}} * \frac{1000\text{mm}^3}{1 \text{ mL}}$$

Fuente: elaboración propia, con base en: PEDRAZA, M y PRADA, M. Evaluación de la biofijación de CO₂ y a partir de las microalgas bajo condiciones de fotobiorreactor a escala laboratorio. Tesis. 2018. p.59. [en línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6729/1/6131002-2018-1-IQ.pdf>

Con esta ecuación se determinó el número de células por mL de cada día luego de la inyección y se realizó un promedio de los datos obtenidos en cada uno de los tres fotobiorreactores, y así, de esta forma obtener el número de células totales generadas con cada inyección y se graficaron para observar el comportamiento de las microalgas.

Gráfica 2. Curva de crecimiento con relación al número de células



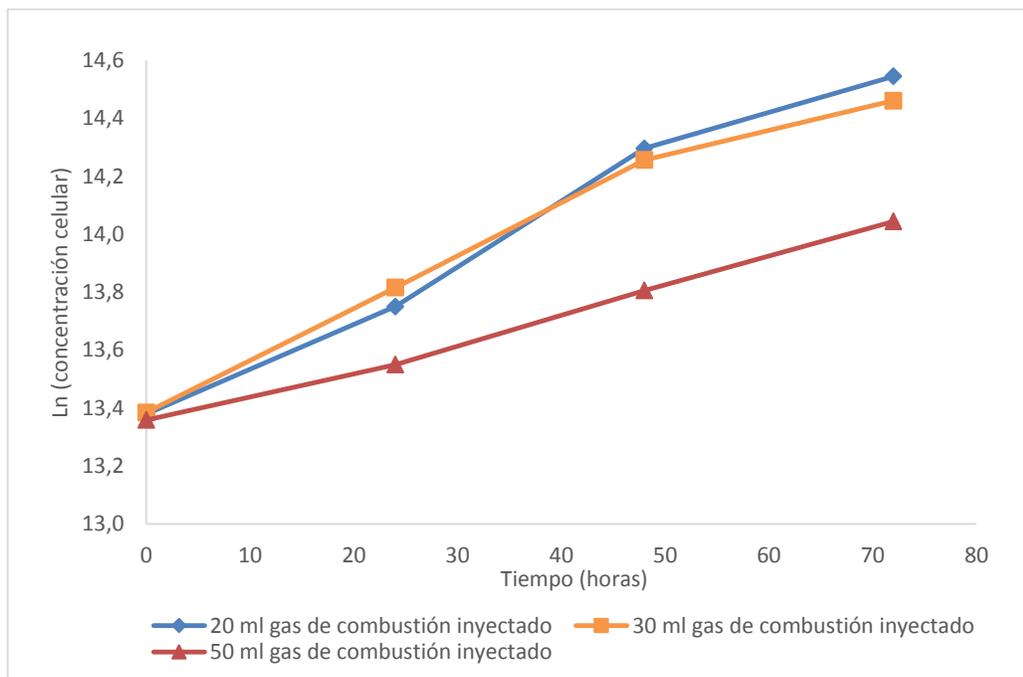
Fuente: elaboración propia.

Como evidencia la **gráfica 2**, el mayor crecimiento de las microalgas se da con la inyección de 20 mL de gas de combustión, generando un número de 2×10^6 cel/mL cel/mL aproximadamente; en esta inyección de gas, 0.000757 mol pertenecen a CO_2 ; para la inyección de 30 mL de gas de combustión, el comportamiento de las microalgas fue similar al de 20 mL de gas, obteniendo $1,9 \times 10^6$ cel/mL.

Con la inyección de 50 mL de gas de combustión se generaron $1,2 \times 10^6$ cel/mL aproximadamente, la desventaja de esta inyección radica en la reducida producción en la fase inicial del cultivo, presentando un comportamiento diferente comparado con las otras inyecciones del gas de combustión; la razón de esta variación es que, al inyectar una mayor cantidad de gas, la absorción y difusividad en el medio disminuyen.

Se determinó el logaritmo natural de los datos de las concentraciones celulares de la gráfica 2 y se obtuvo la gráfica 3 donde se observa la linealización de la curva de crecimiento con recuento celular. Con esta gráfica, se determinó la ecuación de la recta para cada curva y con éstas la velocidad máxima ($\mu_{\text{máx}}$) (ecuación #) de crecimiento de las microalgas para cada una de las inyecciones de gas de combustión.

Gráfica 3. Linealización de la velocidad de crecimiento.



Fuente: elaboración propia.

Ecuación 16. Velocidad máxima de crecimiento celular

$$\ln(N) = \ln(N_0) + \mu_{\max} * t$$

Donde: N: concentración celular a t
N₀: concentración celular en tiempo cero
 μ_{\max} : velocidad máxima
t: tiempo

Fuente: PEDRAZA, M y PRADA, M. Evaluación de la biofijación de CO₂ y a partir de las microalgas bajo condiciones de fotobiorreactor a escala laboratorio. Tesis. 2018. p.59. [en línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6729/1/6131002-2018-1-IQ.pdf>

Tabla 8. Velocidad máxima de crecimiento celular a distintos volúmenes de inyección de gas de combustión

Inyección del gas de combustión (mL)	Ecuación de la recta	μ_{\max} (h ⁻¹)
20	y = 0,0168x + 13,386	0,0168
30	y = 0,0153x + 13,429	0,0153
50	y = 0,0096x + 13,343	0,0096

Fuente: elaboración propia.

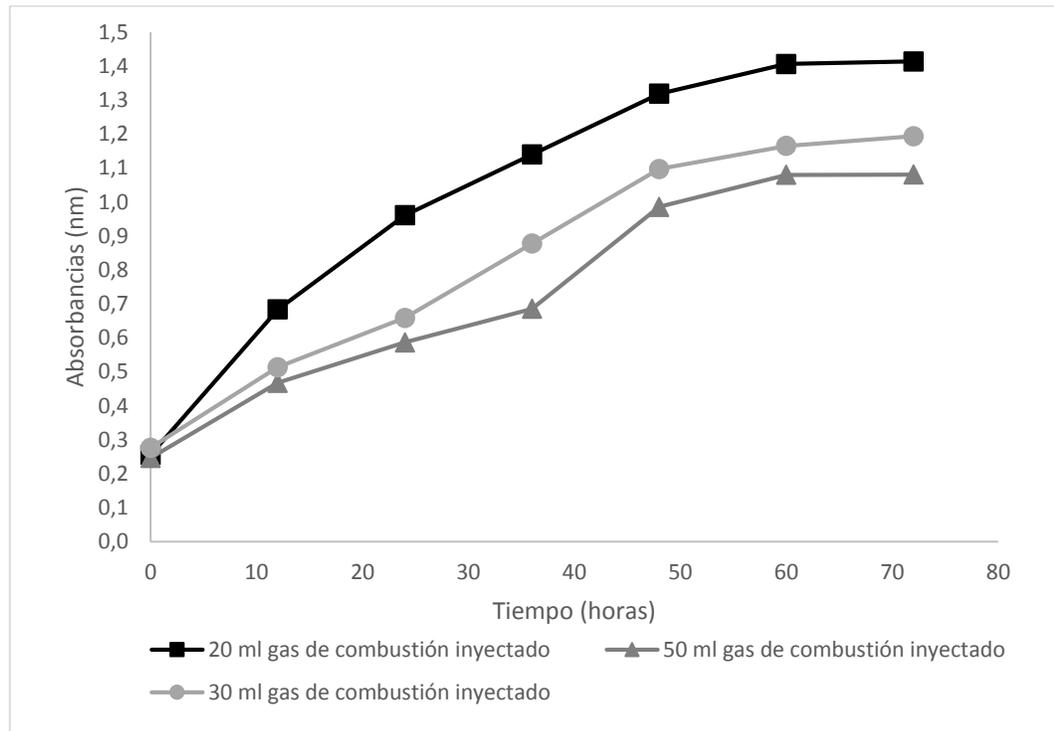
Teniendo en cuenta el comportamiento de las microalgas en la gráfica 2, la inyección de 20mL de gas de combustión generó la máxima velocidad de crecimiento, con un valor de 0,0168 h⁻¹, indicando también que las pequeñas inyecciones generan una mayor de cantidad de biomasa por hora. Además, se evidencia que, las altas concentraciones de gas de combustión, inhiben el crecimiento de las microalgas, como ocurre con la inyección de 50mL.

4.1.2 Curvas de crecimiento. Estas curvas se determinaron a partir de la densidad celular o absorbancia del cultivo, dato suministrado por los sensores fotoeléctricos descritos en el numeral 3.6.4, con el fin de evidenciar el crecimiento de las microalgas con relación a los distintos volúmenes de gases de combustión inyectados en cada reactor. Este método presenta una mayor exactitud de los datos, pues la lectura de las señales se da cada 5 minutos, proporcionando datos desde el primer momento en el que ocurre la inyección.

Para la elaboración de las gráficas, se usaron los datos obtenidos mediante los sensores ópticos cuyo funcionamiento y calibración se describió en el numeral 3.6.4. Las comparaciones entre las medidas de los sensores y el espectrofotómetro

permitieron la transformación de los valores obtenidos, a medidas de absorbancia. Luego se realizaron los promedios de estos datos para establecer el comportamiento del cultivo y se graficaron.

Gráfica 4. Curva de crecimiento de las microalgas con diferentes inyecciones de CO₂



Fuente: elaboración propia.

Este método se comparó con los datos obtenidos a través del conteo celular, arrojando los mismos resultados: el mejor crecimiento se dio con la inyección de 20 mL de gas de combustión, presentando adicionalmente un comportamiento de ascenso continuo con el tiempo, a diferencia de la inyección de 50 mL, que en las primeras 40 h demostró un crecimiento bajo, hasta las 70h donde se dio un decrecimiento celular, que pudo deberse a la saturación del medio debida a la considerable inyección del gas de combustión, por lo que se descartó de inmediato esta inyección.

4.2 pH DEL MEDIO. Como se mencionó previamente, este parámetro actúa bajo la influencia de diversos factores como la respiración, la producción algal, la actividad microbiana, la adición de nutrientes y el pH de estos. Teniendo en cuenta que el CO₂ tiene un pH ácido, este parámetro no fue controlado a lo largo de la experimentación, pues cambiaba su acidez conforme las microalgas lo iban

absorbiendo, igualmente, se hizo un seguimiento continuo de este parámetro mediante un pH-metro. La primera medición se realizó sin la inyección de gas de combustión, para determinar la variación que registraba el pH con esta, posteriormente se realizaron mediciones cada día con el fin de analizar la influencia que tiene el equilibrio entre carbonatos en crecimiento de las microalgas.

Para esto, se determinó la influencia del pH con base en la inyección que generó el mayor crecimiento de las microalgas, obteniendo los siguientes datos:

Tabla 9. Influencia del pH en el crecimiento celular

Días	pH	Células/mL
1	9,55	730000
2	7,4	1250000
3	5,98	2170000
4	4,94	2410000
5	4,18	2260000

Fuente: elaboración propia.

El primer dato evidencia que a condiciones normales el pH del cultivo es básico, pero a media que se le inyecta el gas, el cultivo se va acidificando y las microalgas aumentan su número de células como consecuencia del suministro de CO₂. Pero al alcanzar un pH inferior al 4,5 el crecimiento comienza a disminuir, generando incluso algunas muertes celulares, esto ocurre porque la fase líquida alcanza la saturación ocasionando el desplazamiento hacia el lado opuesto de los carbonatos, disminuyendo consecuentemente la actividad fotosintética de los microorganismos¹²⁵, lo cual se traduce en decrecimiento celular.

Pese a que los gases de combustión, además de CO₂, CO e H₂, pueden contener partículas de SO_x, NO_x e hidrocarburos, las cuales demostraron no afectar el crecimiento de las microalgas, pero sí tuvieron una repercusión en el pH del medio, el cual se acidificó en mayor medida con la inyección de mayores cantidades de gas de combustión, por lo que se debe tener especial cuidado con este parámetro, pues un exceso de acidez en el medio puede ocasionar la inhibición del crecimiento celular.

¹²⁵ ÁLVAREZ, Andrea; SÁNCHEZ, P & BERNAT, Jorge. Biofijación de CO₂ Mediante el Cultivo de Algas. Diseño de un Prototipo de Fotobiorreactor para el Cultivo de Spirulina Platensis. CONAMA: 2012. Congreso nacional de medio ambiente. [en línea]. Universidad de Oviedo. Disponible en: <http://www.conama2012.conama.org/conama10/download/files/conama11/CT%202010/1896706028.pdf>

4.3 BIOFIJACIÓN DE CO₂

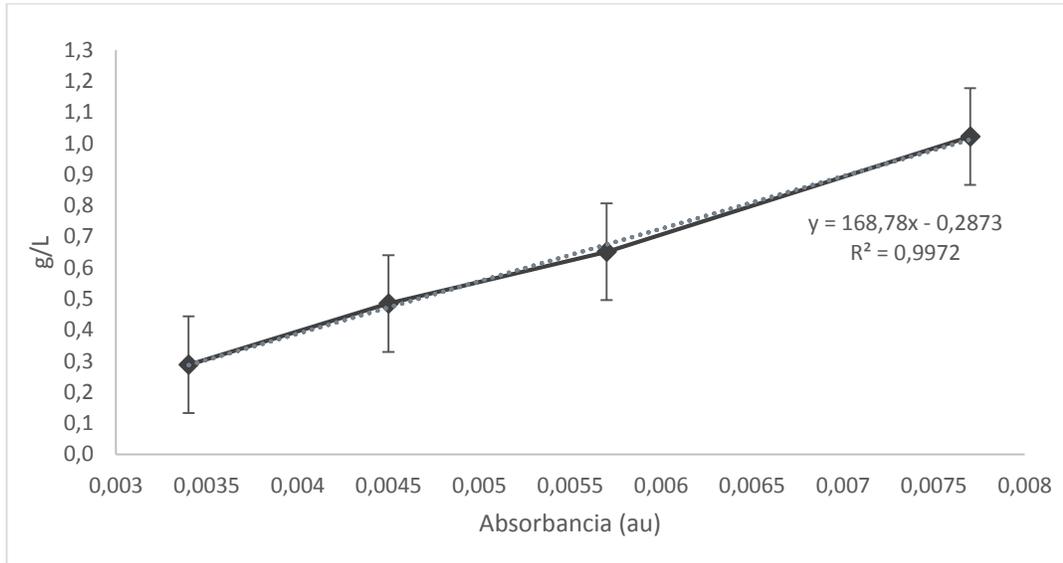
El grado de biofijación es un parámetro que depende del crecimiento del cultivo, expresado como el incremento de su número de células en forma de biomasa y puede evaluarse a través de los métodos de crecimiento celular detallados previamente o mediante el peso seco, cantidad de proteína, o carbono celular total. Para determinar el peso seco de la biomasa obtenida, inicialmente las capsulas fueron secadas en el horno a 115°C durante 24 horas. Pasado este tiempo, se dejaron en el desecador durante 60 minutos, para posteriormente pesar cada cápsula y tomar nota de este valor.¹²⁶

Las muestras del cultivo fueron extraídas en la cabina de flujo laminar, con el fin de evitar la contaminación de los FBR. Se tomaron alícuotas de 20 mL de cada reactor y se hicieron tres diluciones para cada muestra: la primera fue 50% es decir, 50% de medio y 50% de muestra, la segunda fue 30% muestra y 70% medio y la tercera fue de 70% muestra y 30% medio. Con estas diluciones, se leyeron las absorbancias de cada una y se comparó con la muestra sin dilución en el espectrofotómetro, utilizando agua destilada como blanco. Se llevaron a la centrifuga durante 15 minutos a 4500 rpm. Pasado este tiempo se descartó el sobrenadante (líquido) dejando un pellet en la parte inferior del tubo falcon, en el cual se adicionaron aproximadamente 5ml de medio y para la homogenización del mismo se utilizó un agitador tipo vórtex.

Cada suspensión se agregó en las cápsulas iniciales, las cuales se encontraban limpias y secas y pesadas, para ser llevadas nuevamente al horno a 115°C durante 24 h. Pasado este tiempo, se pesan las cápsulas con la muestra seca y se tabulan los datos para graficarlos, obteniendo finalmente el siguiente comportamiento para la inyección de 20 mL de gas de combustión.

¹²⁶ PEDRAZA, M y PRADA, M. Op. Cit, 73.

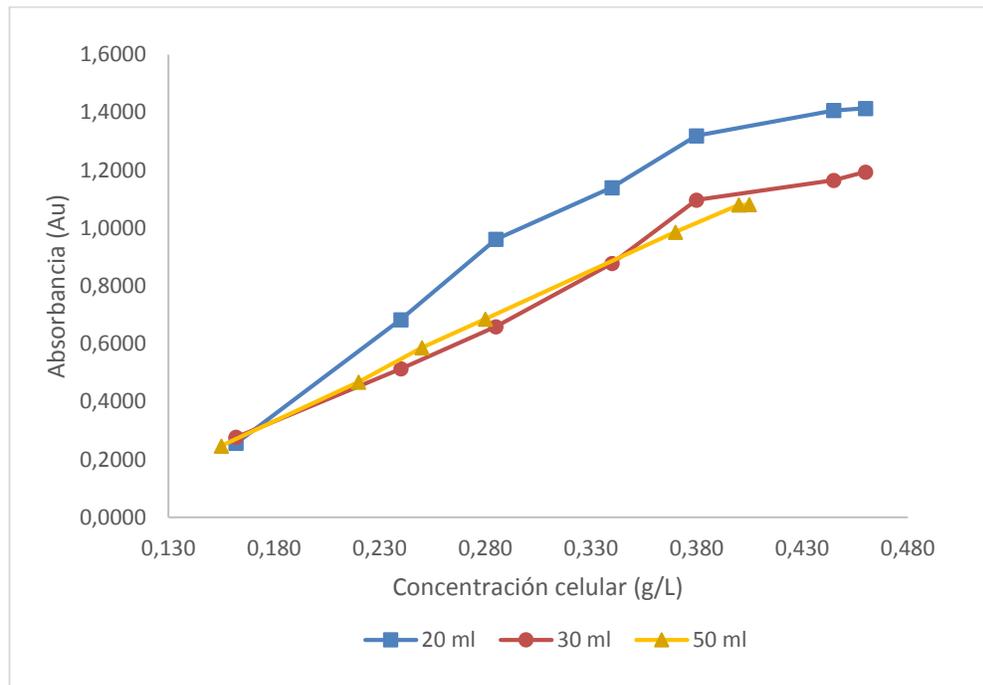
Gráfica 5. Curva de calibración Peso seco.



Fuente: elaboración propia.

Finalmente se graficaron los datos obtenidos con el fin de determinar la cantidad de biomasa obtenida con cada inyección.

Gráfica 6. Biomasa obtenida con cada inyección



Fuente: elaboración propia.

En las anteriores gráficas se evidencia que ninguna curva de calibración pasa por el origen, este hecho puede explicarse por la configuración del blanco, la cual se realizó con agua destilada y no con el medio del cultivo (agua y orina)

4.3.1 Porcentaje (%) de biofijación. A partir de la determinación del peso seco, se calculó la biofijación con la siguiente ecuación:

Ecuación 17. Biofijación de CO₂ a partir de productividad de biomasa seca

$$\% \text{ Biofijación de } CO_2 = P \times C \times \frac{M_{CO_2}}{M_c}$$

Donde;

P = Productividad de biomasa seca (g/L*d)

C = Carbón que contiene la biomasa.

M_{CO_2} = Peso molecular de CO₂ (g)

M_c = Peso molecular de C (g)

Fuente: PEDRAZA, M y PRADA, M. Evaluación de la biofijación de CO₂ y a partir de las microalgas bajo condiciones de fotobiorreactor a escala laboratorio. Tesis. 2018. p.59. [en línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6729/1/6131002-2018-1-IQ.pdf>

Inicialmente se leyeron las absorbancias de la curva de crecimiento obtenida por los sensores fotoeléctricos en la **gráfica 4**, para obtener los valores de biomasa correspondientes y se calculó la diferencia entre la cantidad de biomasa final con la inicial. Posteriormente se reemplazaron los datos necesarios para determinar la biofijación.

La composición másica de carbono varía dependiendo de la especie de microalga. Para *Chlorella vulgaris* de acuerdo con la literatura, el rango oscila entre 51,4 - 72,6%¹²⁷ por lo que se hizo un promedio entre estos valores, con el fin de determinar la composición másica de carbono. La cual fue de 62%.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

¹²⁷ RAMKUMAR K. MANDALAM, BERNHARD y PALSSON. Elemental balancing of biomass and medium composition enhances Growth Capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures [en línea]. Universidad de Michigan. 1998. [Consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10099378>

Tabla 10. Biofijación de CO₂ a partir de la productividad de biomasa seca para las distintas inyecciones del gas de combustión.

Inyección mL	Biomasa total (g/L)	Productividad (g/L*d)	Composición de carbono	Biofijación (g/L*d)	% Biofijación
20	0,335	0,112	0,620	0,254	25,386
30	0,298	0,099	0,620	0,226	22,582
40	0,2500	0,083	0,620	0,189	18,944

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que la cantidad producida de biomasa por litro en el cultivo fue de 0,3350, 0,298 y 0,2500 g/L, para las inyecciones de 20, 30 y 50 mL de gas de combustión respectivamente, obteniendo un valor mayor de biomasa, así como el porcentaje de biofijación para la inyección de 20 mL de gas de combustión, comportamiento que se evidenció a lo largo de los ensayos.

La inyección de los 20 mL de gas de combustión generó una biofijación de 0,254 g/L*d, cifra que depende directamente del volumen del cultivo, que en este caso fue de 250 mL, por lo que se hizo una relación para determinar la cantidad que se produciría en 1L de cultivo al día, obteniendo una biofijación aproximada de 1,016 g/L*d, esto con el fin de comparar este valor con los resultados obtenidos con el suministro de CO₂ puro por parte de PEDRAZA & PRADA¹²⁸ y GARCIA¹²⁹, los cuales fueron de 1,65 g/L*d. y 1,3 g/L*d, respectivamente.

Tras esta comparación se puede concluir que el volumen de la fuente de carbono (CO₂) es un factor determinante para la biofijación de este, pero demuestra además la capacidad de las microalgas para fijar el CO₂ aun en presencia de los demás gases generados en un proceso de combustión.

4.3.2 Relación de carbono en cada fase. Para determinar la cantidad de carbono fijado, se tomaron los valores de biomasa producida y se multiplicaron por el porcentaje de carbono presente en las microalgas, para calcular de esta manera la cantidad total de carbono.

¹²⁸ PEDRAZA, M y PRADA, M. Op. Cit, p.18.

¹²⁹ GARCIA, R. Op. Cit, p.113.

Por otro lado, la cantidad de carbono disponible, depende del volumen de gas inyectado, por lo que se calcularon las moles de CO₂ presentes en los volúmenes inyectados de acuerdo a la **ecuación 10**, obteniendo un total de 0,0019 y 0,0007 moles de CO₂ respectivamente. Finalmente se hizo la conversión de las moles de CO₂ a g de carbono, mediante los pesos moleculares de estos compuestos para hacer la relación del carbono presente en cada fase. Los datos obtenidos se resumieron en el **cuadro 4**, mostrado a continuación:

Cuadro 4. Cantidad de Carbono presente en el cultivo con las distintas inyecciones de gas de combustión.

Cantidad total de carbono fijado (Fase líquida)	Cantidad de carbono disponible (fase gas)						Relación fase líquida/gaseosa
	Moles de CO ₂			Carbono (g)			
20 30 50	20 30 50	20 30 50	20 30 50	20 30 50	20 30 50	20 30 50	
0,2077 0,1848 0,1550	0,0007 0,0012 0,0019	0,3993 0,4992 0,4592	0,5201 0,3701 0,3375				

Fuente: elaboración propia.

Con el **cuadro 4** se demuestra que la cantidad de carbono presente en la fase gaseosa de los FBR es mayor, comparada con la fase líquida, pues para la inyección de 20mL se obtuvieron 0,3993g de carbono en la fase gaseosa, mientras que en la fase líquida se tienen tan solo 0,2077g de carbono. Esto teniendo en cuenta que el CO₂ del sistema proviene de la combustión de la cascarilla de arroz, la cual contiene este gas en grandes proporciones.

5. CONCLUSIONES

- Las especificaciones técnicas del sistema de combustión, mencionadas en el capítulo 2, se definieron con base en la producción de CO₂, utilizando materiales adecuados para llevar a cabo el proceso. Por otro lado, la ausencia de hollín durante la combustión sugiere que es poco probable la producción de monóxido de carbono (CO). Otro factor importante fue el almacenamiento de este gas en el interior de una almohada inflable, lo cual demostró ser un método adecuado, ya que permitió una provisión por un periodo de 5 meses, asegurando un sello hermético.
- Se logró el crecimiento del cultivo de microalgas con la adecuación de los parámetros necesarios, demostrando que el sistema de agitación fue el adecuado para este tipo de fotobiorreactor, teniendo en cuenta que se homogenizó el cultivo, aumentando adicionalmente la solubilidad del CO₂ en el medio. El montaje de los FBR se realizó con materiales de fácil adquisición y bajo costo, con el fin de demostrar que mientras que los parámetros necesarios para el funcionamiento de los sistemas fueran correctamente controlados, en este caso, mediante la incubadora, se podría simular el comportamiento de equipos especializados para el crecimiento de estos microorganismos hecho que demuestra su accesibilidad en laboratorios con bajo presupuesto al reducir costos de operación.
- El suministro de 20 mL del gas proveniente de la combustión de la cascarilla de arroz a 250mL de cultivo, generó una producción de 0,335g de biomasa por cada litro de cultivo. Ésta fue la mejor proporción, después de comparar con inyecciones de 30 y 50 mL de gas de combustión. Los porcentajes de biofijación obtenidos para 20, 30 y 50 ml de gas de combustión fueron aproximadamente 25%, 22% y 18% respectivamente.
- El crecimiento celular obtenido con la inyección de CO₂ proveniente de un proceso de combustión fija, sugiere que la capacidad de biofijación de la microalga *Chlorella vulgaris* depende de sus requerimientos nutricionales y no de la pureza de la fuente de carbono (CO₂) suministrada, dato que permite el posicionamiento de estos microorganismos como alternativa ficorremediadora para mitigar la masiva emisión de GEI a la atmosfera, provenientes de diversos procesos de combustión.

6. RECOMENDACIONES

- Trabajar con volúmenes pequeños para ahorrar tiempo en las pruebas.
- Al preparar el medio de cultivo, se debe optar por una agitación vigorosa para prevenir la aparición de sedimentos.
- Por el contrario, al servir las cajas de Petri, se debe evitar la agitación masiva para prevenir la aparición de grumos.
- Antes de suministrar el gas almacenado se debe inyectar un pequeño volumen de aire para verificar que el sistema esté sellado herméticamente.
- Tener especial cuidado con el tiempo de incubación de las microalgas en las cajas de petri pues el medio se irá evaporando y este tiempo de evaporación dependerá del volumen empleado al servir las cajas.
- Tanto el caucho de silicona como la resina son hidrofílicos, por lo que con el tiempo irán perdiendo sus propiedades herméticas, por lo que se deben tener crear varios acoples de este tipo para reemplazarlos cuando se vean deteriorados.
- Realizar las inyecciones el primer día de inoculación de los FBR y evaluar el crecimiento si es posible hasta que se considere que se ha llegado a la fase de latencia, para obtener mejores resultados.
- Para aumentar la cantidad de células obtenidas, puede suministrarse un mayor volumen del gas, para aumentar el contenido de CO₂ (por debajo de 50 ml), pero cuidando el pH del cultivo con la inclusión de una base que ajuste su acidez.
- Realizar pruebas con inyecciones menores a 20mL de gas de combustión para encontrar específicamente la que ocasiona el mejor crecimiento del cultivo de *Chlorella vulgaris*.

BIBLIOGRAFÍA

ALGAE. Suministro de investigación de algas [en línea]. s.f. Disponible en: <https://algaeresearchsupply.com/products/algae-culture-chlorella-vulgaris>

ALIENERGY. Alternativas integrales de energía renovable. Aprovechamiento cascarilla de arroz. [en línea]. Colombia. 2010. Disponible en: http://www.alienergy.com.co/proyectos_3.html

ÁLVAREZ, Andrea; SÁNCHEZ, P & BERNAT, Jorge. Biofijación de CO₂ Mediante el Cultivo de Algas. Diseño de un Prototipo de Fotobiorreactor para el Cultivo de Spirulina Platensis. CONAMA: 2012. Congreso nacional de medio ambiente. [en línea]. Universidad de Oviedo. Disponible en: <http://www.conama2012.conama.org/conama10/download/files/conama11/CT%202010/1896706028.pdf>

AMBIENTUM. La combustión como proceso de transformación energética. Enciclopedia mediambiental. s.f. [en línea]. [Consultado el 3, febrero, 2020]. Disponible en: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/la_combustion.asp

ANM. Agencia Nacional de Minería reporta accidentes mineros en Boyacá y Caldas. [en línea]. Colombia. 2014. Disponible en: https://www.anm.gov.co/?q=ANM_reporta_accidentes_mineros_en_Boyaca_y_

BARAJAS, A; GODOY, C; MONROY, J y KAFAROV, V. Mejoramiento del secuestro de CO₂ por *Chlorella vulgaris* en FBR a escala laboratorio. UIS. [en línea]. Bucaramanga: 2012. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2012000200005

BARREDA, M.; IAIANI, C.; SOTA, J. D. Hormigón reforzado con fibras de polipropileno: tramo experimental de un pavimento de hormigón. IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga: 2000, [en línea] p. 1145-1150. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/c233/3e10857e34dedf5606a5ba2d9c6b5ee9efbe.pdf>

BENAVENTE-VALDÉS, J. R., MONTAÑEZ, J. C., AGUILAR, C. N., MÉNDEZ-ZAVALA, A., & VALDIVIA, B. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. Revista Acta Química Mexicana. Coahuila: 2011, Vol.4, Nro.7. pp. 1-12. Reserva: 04-2011-101709565500-102

BOTERO, Mónica. CERÓN, Ivonne & CARDONA, Carlos. Cálculo de la solubilidad del CO₂ en sistemas iónicos acuosos. *Avances Investigación en ingeniería*: 2012, Vol.9. pp. 1-86. Disponible en: <https://revistas.unilivre.edu.co/index.php/avances/article/view/2738>

BOTTA, Néstor. Dinámica de las explosiones industriales. [en línea] Red Proteger: 2015 1° Edición. ISBN 978-987-27889-9-5. Disponible en: https://www.redproteger.com.ar/editorialredproteger/serieexplosiones/30_Dinamica_Explosiones_Industriales_%201a_edicion_Diciembre2015.pdf

BRICEÑO, Gabriela. Ciclo de Calvin. Euston [en línea]. s.f. Disponible en: <https://www.euston96.com/ciclo-de-calvin/>

CALVAY, J. Diseño y construcción de un gasificador de lecho fijo para la producción de gas de síntesis. 2018. [en línea]. Disponible en: https://issuu.com/jcalvay/docs/disen_o_y_construccion_de_un_gasifi

CARACOL RADIO. Por primera vez en 10 años se reducen índices de deforestación en Colombia. [en línea] Colombia. 2019. Disponible en: https://caracol.com.co/radio/2019/07/10/nacional/1562779685_799955.html

CARDOZO, Angie. Diseño y montaje de un sistema continuo de reactores FBR y UASB en serie para la producción de metano. Proyecto de grado. 2017. Universidad Antonio Nariño. p.27.

CARTER, Martin & GREGORICH, E. Total and organic carbon. In: *Soil sampling and methods of analysis*. 2nd ed. Boca Raton, FL. Taylor & Francis Group. ISBN-13: 978-0-8493-3586-0. p.162.

CHIA-YING, Chianga. DE-WEI, Lee & HWAI-SHEN, Liub. Carbon dioxide capture by sodium hydroxide-glycerol aqueous solution in a rotating packed bed. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*: 2017. Vol.72, pp.29-36. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.023>

CLEMENT-LAROSIERE, Barbara. Etude de la croissance de *Chlorella vulgaris* en photobioréacteur batch et continu, en présence de concentrations élevées de CO₂. p.9. [en línea]. Autre. Ecole Centrale, Paris. 2012. Disponible en: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00697006/document>

CO₂.EARTH. Daily CO₂. Máximos históricos de todos los tiempos. ProOxygen. [en línea]. Colombia: 2019. [Consultado: 30 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://es.co2.earth/daily-co2>

CONTRERAS, F. Citado por: PÉREZ Alexis y LABBÉ José. Microalgas, cultivo y beneficios *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. Chile: 2014, Vol.49, Nro. 2, pp.157-173, DOI: 10.4067 / S0718-19572014000200001

CORONADO, E. Pruebas no destructivas de hermeticidad. Metalografía, Universidad Tecnológica de Pereira. [en línea]. 2015. Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/12-4-3-pruebas-no-destructivas-de-hermeticidad/>

ECHARRI L. Ciencias de la tierra y del medio ambiente. Tema 8. [en línea]. s.f. Disponible en: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoescuela/recursos-digitales/2014/11/10/libro-electronico-de-ciencias-de-la-tierra-y-del-medio-ambiente/>

ESPARZA, Felix. Tipos de combustibles. En: Combustibles, sólidos, líquidos y gaseosos. Bomberos de Navarra. s.f. p.26-31

FARMER, R & ARNDT R.E.A. [1995]. Citado por: DONCEL, Jennifer & MORENO, Heidy. Evaluación de la influencia de la agitación para la producción de biomasa microalgal en un FBR panel plano. Proyecto de grado. Universidad de América, Bogotá D.C: 2017

FERNANDEZ, Jose. Microalgas: Definición y características. Ing de Procesos aplicada a la Biotecnología. Universidad de Almería. Sevilla 2014. [en línea]. Disponible en: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1-microalgas.html>

GARCIA, ARBELAEZ, C. El acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático. 1° ed. [en línea]. Cali. 2016. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/el_acuerdo_de_paris_frente_a_cambio_climatico.pdf

GARCÍA, J. La deforestación nos lleva hacia un mundo sin bosques. [en línea] España. 2017. Disponible en: <http://www.vidasostenible.org/informes/la-deforestacion-nos-lleva-hacia-un-mundo-sin-bosques/>

GARCIA, Ricardo. Combustión y Combustibles. Teoría de la combustión. Trabajo de grado de Maestría. p.3. 2001.

GÓMEZ, Liliana. Microalgas: aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*: 2007, Vol.19, Nro. 2, pp.3-20. ISSN: 0258-5995.

GONZALES, Alicia. ¿Qué son las microalgas? Interés y uso. Fichas de transferencia. *Revista Cajamar ADN*. Fundación CAJAMAR: 2015, Nro.011. pp. 1-11. p.6.

GREENPEACE. El lado oscuro del carbón. [en línea]. España. 2018. Disponible en: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/carbon/el-lado-oscuro-del-carbon/>

GSBS. Microalgas. Un microorganismo con gran potencial. [en línea]. 2018. Disponible en: <https://www.greenseabiosystem.com/nosotros/que-son-las-microalgas/>

HE, Lian; SUBRAMANIAN, Venkat & TANG, Yinjie. Experimental análisis and model-based optimization of microalgae growth in photo-bioreactors using flue gas. ELSEVIER: 2012. Washington University. Vol.41, pp.131-138. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.02.025

HERGUEDAS, Ana. & GARCIA, E. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. ITAGRA: 2012. Centro Tecnológico agrario y agroalimentario. ISBN: 978-84-931891-5-0. Disponible: <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>

HERSKOWITS, D. HERSKOWITS, V. STEPHAN, K. & TAMIR, A. Caracterización de un absorbedor de chorro de impacto bifásico II. Absorción con reacción química de CO₂ en soluciones de NaOH. *Ciencia de Ingeniería Química*: 1990. Vol.45, Nro.5, pp.1281-1287. DOI: 10.1016 / 0009-2509 (90) 87120-h

IDEAM. Comunicación nacional de cambio climático. PNUD. [en línea]. Colombia: 2012. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf

IDEAM. Resolución 0062 de 2007. [en línea]. s.f. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/51310/56882/Parte_2_Resolucion_0062_de_2007.pdf/007d7059-15fd-47a5-bc60-2109e77a7208

INECC. Tipos de contaminantes atmosféricos. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. [en línea]. México. 2007. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C: El instituto, 2018. ISBN: 9789588585673 153 p.

JACOB, Eduardo y TEIXEIRA, Telma. Microalgae based systems for carbon dioxide sequestration and industrial biorefineries. p.136. [en línea]. Biomass IntechOpen: 2010. ISBN: 978-953-307-113-8. [Consultado: 30 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/biomass/microalgae-based-systems-for-carbon-dioxide-sequestration-and-industrial-biorefineries>

MARROQUÍN, Jorge. Desarrollo de biorreactores controlados aplicables al estudio de cultivo de microorganismos de interés comercial. Bogotá D.C: 2018. [Tesis de grado]. Universidad distrital Francisco José de Caldas.

MARTINEZ, Isidoro. Proceso de combustión: Características. En: Termodinámica básica y aplicada. España: editorial DOSSAT, S.A. s.f. ISBN: 84-237-0810-1. p.357-361.

MARTÍNEZ JD, PINEDA TG, LÓPEZ JP y BETANCUR M. Experimentos de combustión con cascarilla de arroz en lecho fluidizado para la producción de ceniza rica en sílice. Antioquia. 2010. Disponible en: <https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/211/2/333.794S571.pdf>

MIN PRTR. Fósforo total. [en línea]. Ministerio para la Transición Ecológica, Plaza San Juan de la Cruz. España. S.f. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Fosforo-total,15600,11,2007.html>

MORENO, Gonzalo. SERRANO, Juan. & PALACIOS, Jhon. Desempeño de la combustión de desechos industriales en un reactor de lecho fluidizado burbujeante. Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia: 2009. pp.251-266. ISSN 0123-2126

MORENO, E y VANEGAS, D. Diseño de un biorreactor esterilizable y de bajo costo para el crecimiento de microorganismos. [Tesis]. Universidad distrital Francisco José de Caldas [en línea] Bogotá. 2017. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/12989/1/VanegasGutierrezDanielFernando2018.pdf>

ORTIZ FONNEGRA, María Isabel. Cocinar en leña o carbón causa el 17% de muertes por calidad del aire. [en línea]. En: El Tiempo, Medellín, Colombia. 26, junio, 2017. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/cocinar-en-lena-o-carbon-causa-muertes-por-calidad-del-aire-103026>

PEDRAZA, M y PRADA, M. Evaluación de la biofijación de CO₂ y a partir de las microalgas bajo condiciones de fotobiorreactor a escala laboratorio. Tesis. 2018. p.59. [en línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6729/1/6131002-2018-1-IQ.pdf>

PÉREZ Alexis y LABBÉ José. Microalgas, cultivo y beneficios *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. Chile: 2014, Vol.49, Nro. 2, pp.157-173, DOI: 10.4067 / S0718-19572014000200001

PIÑEROS CASTRO, Yineth. Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia. [en línea]. Bogotá. 2014. Página 14. Disponible en: http://avalon.utadeo.edu.co/servicios/ebooks/2015/aprovechamiento_de_biomasa/files/assets/basic-html/page14.html

PROTOCOLS.IO. Cómo hacer una solución madre de cloranfenicol. 2014. [dx.doi.org/10.17504/protocols.io.ci5ug5](https://doi.org/10.17504/protocols.io.ci5ug5) [en línea]. Disponible en: <https://www.protocols.io/view/How-to-make-a-25-50-mg-ml-Chloramphenicol-Stock-So-j93ug5>

RAMÍREZ, Luis. Queiroz, L & Jacob, Eduardo. Fotobiorreactor: Herramienta para el cultivo de cianobacterias. [en línea] Revista: Ciencia y Tecnología: 2013, Vol.6, Nro.2, pp.9-19. ISSN 1390-4051. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4749461>

RAMKUMAR K. MANDALAM, BERNHARD y PALSSON. Elemental balancing of biomass and medium composition enhances Growth Capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures [en línea]. Universidad de Michigan. 1998. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10099378>

RUBIO, Silvia & ZAMORA, Anneth. Estudio de la influencia de la geometría y el sistema de agitación sobre el comportamiento reológico de las emulsiones agua/aceite. [en línea]. Proyecto de grado. Universidad de los Andes, Bogotá D.C: 2019. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23908/u346257.pdf?sequence=1>

SÁEZ VEGA, Alex. Microalgas para reducir emisiones de CO2. Universidad EAFIT. [en línea]. Medellín. 2017. Disponible en: <http://www.eafit.edu.co/investigacion/revistacientifica/edicion162/Paginas/microalgas-para-reducir-emisiones-de-co2.aspx>

SALGADO, R. Cascarilla de arroz: un excelente sustituto de la madera. 2005.

SEMANA. Alemania recorta ayudas por aumento de la deforestación en la Amazonia. [en línea]. Semana sostenible. Impacto. Colombia. 2019. Disponible en: <https://sostenibilidad.semana.com/impacto/articulo/alemania-recorta-ayudas-ante-deforestacion-en-la-amazonia/45323>

SIERRA, Jaider. Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Monografía. Universidad de Sucre. Sincelejo: 2009.

SMITH Kirk. El uso doméstico de leña en los países en desarrollo y sus repercusiones en la salud. 2006. [en línea]. *Unasyuva* 224, Vol. 57, pp. 41-44. Disponible en: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/009/a0789s/a0789s09.pdf>

SNYDER, J.D. & TROFYMOW, J.A. A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil samples. 1984. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* Vol.15, pp. 587–597.

SOROOSH, H. Considering human urine as nutrients resource for cultivation of microalgae *Scenedesmus quadricauda* for biodiesel production in photoautotrophic metabolism. Tesis maestría [en línea]. 2011. [Consultado: 3 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/1735>

SOSTENIBILIDAD. Claves para entender la huella de carbono. [en línea]. 2018. Disponible en: <https://www.sostenibilidad.com/cambio-climatico/claves-para-entender-la-huella-de-carbono/>

SYMMES COBB, Julia. THOMSON REUTERS. Producción colombiana de carbón probablemente se mantendrá estable en 2019, dicen compañías. [en línea]. colombia. 2019. Disponible en: <https://lta.reuters.com/articulo/colombia-carbon-idltakcn1q229g>

TIPANLUISA, L. Caracterización de los productos de combustión de la cascarilla de arroz utilizando un sistema térmico con capacidad de 60.000Kcal/h. Duraspace. 2012. [en línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/5191>

TUANTET, Kanjana. Microalgae cultivation for nutrient recovery from human urine [en línea]. Título de doctor. Wageningen, Países Bajos: Universidad de Wageningen. 2015. [Consultado: 6 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/337297>

UNIÓN DE ARROCEROS S.A. Propiedades químicas y físicas de la cascarilla de arroz. 1992. Molino San Joaquín. Espinal.

VALDÉS, F. HERNÁNDEZ, M. & MARCILLA, A. Estimationn of CO₂ stripping/CO₂ microalgae consumption ratios in a bubble column photobioreactor using the analysis of the pH profiles. [en línea]. *Bioresource Technology*: 2012. Nro.119. pp. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.120>

VARGAS, Sandra. ONATRA, William, OSORNO, Lucia & Páez, E. Contaminación atmosférica y efectos respiratorios en niños, mujeres embarazadas y adultos mayores. [en línea] Revista UDCA: 2008. Disponible en: <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/600/552>

VARÓN, Javier. Caracterización térmica y estequiométrica de la combustión de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*: 2004. UTP, Vol.10, Nro.24, pp.139-144. ISSN: 0122-1701. p.141.

VERGARA, L. Captura de CO₂ por *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* bajo condiciones controladas en fotobiorreactores. 2019. Proyecto de grado.

WANG, L., MIN, M., LI, Y. y COL. Cultivo de algas verdes *Chlorella* sp. en diferentes aguas residuales de la planta municipal de tratamiento de aguas residuales. *Appl Biochem Biotechnol*: 2010. Vol.162, pp 1174-1186 (2010). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8866-7>

ANEXOS

ANEXO A.

MONTAJE DEL REACTOR DE COMBUSTIÓN

Figura 29. Sello de caucho para la extracción del gas de combustión.



Figura 28. Compresor empleado para el almacenamiento del gas.



Figura 30. Reactor de combustión



ANEXO B.
PRUEBA DE AGITACIÓN EN EL FBR

Figura 31. Prueba con anilina para demostrar la capacidad del impulsor



ANEXO C.
INTENSIDAD LUMÍNICA DE LA INCUBADORA.

Tabla 11. Mediciones de la intensidad lumínica de la incubadora

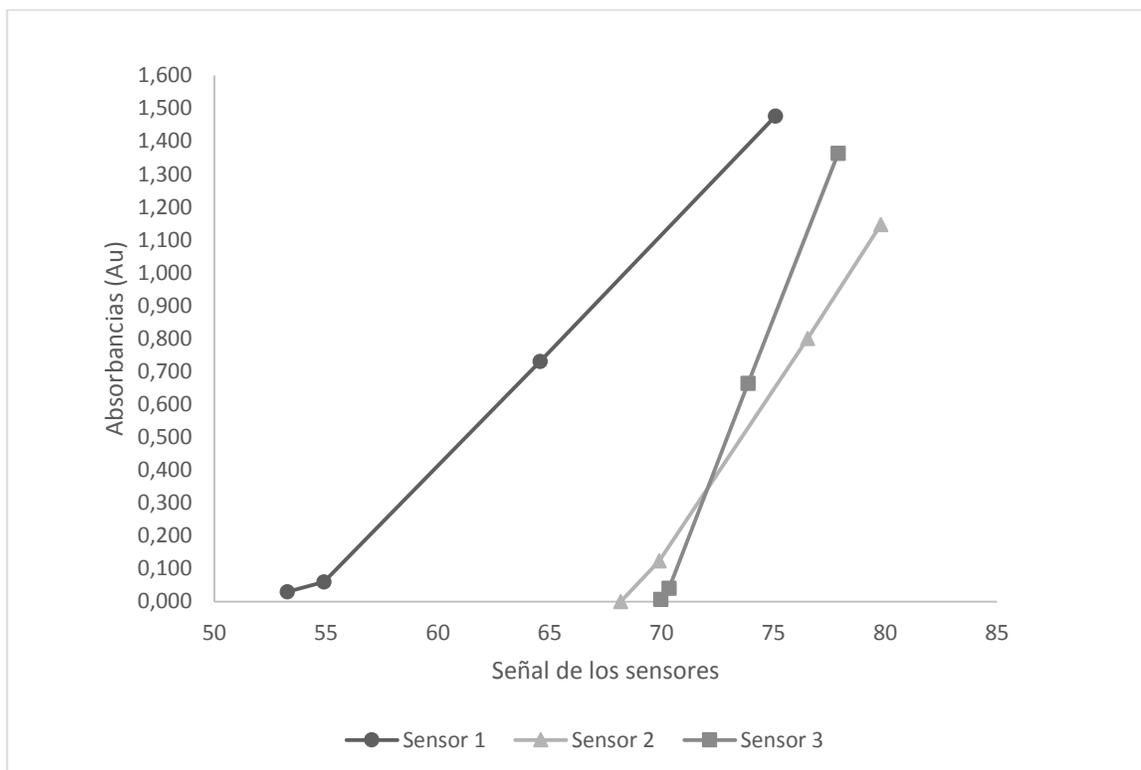
MEDICIONES	
ZONA	LUXES
	1063
Inferior	1064
	1067
	950
Reactor 1	1011
	1075
	939
Reactor 3	1074
	1220
	947
Reactor 2	1086
	1189
	645
Entre reactores	777
	598
PROMEDIO	1059

Fuente: elaboración propia.

ANEXO D.

CURVA DE CALIBRACIÓN USANDO AGUA DESTILADA COMO BLANCO

Gráfica 7. Curva de calibración de los sensores



Fuente: elaboración propia.

Las ecuaciones de la recta para las señales de los sensores usando como blanco agua destilada son las siguientes:

Sensor 1: $y = 0,0677x - 3,6175$ con $R^2 = 0,9972$

Sensor 2: $y = 0,0997x - 6,8214$ con $R^2 = 0,9984$

Sensor 3: $y = 0,1727x - 12,093$ con $R^2 = 0,9996$

ANEXO E.

MONTAJE DE LOS FOTOBIORREACTORES Y DE LA INCUBADORA.

Figura 32. Fotobiorreactores contruidos.

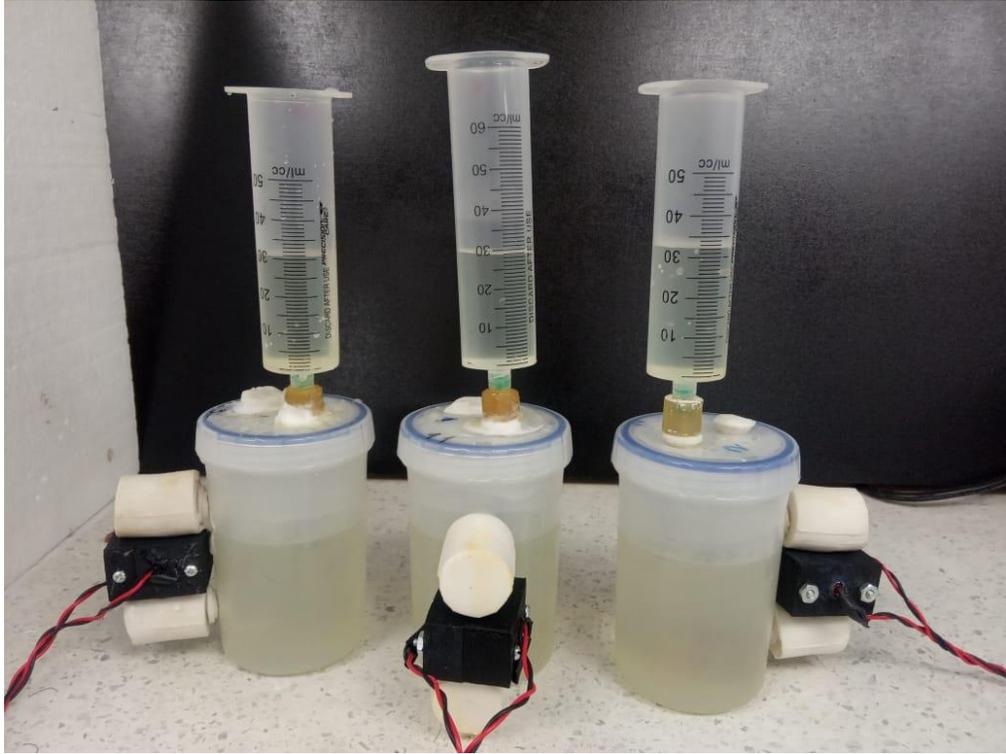


Figura 33. Interior de la incubadora

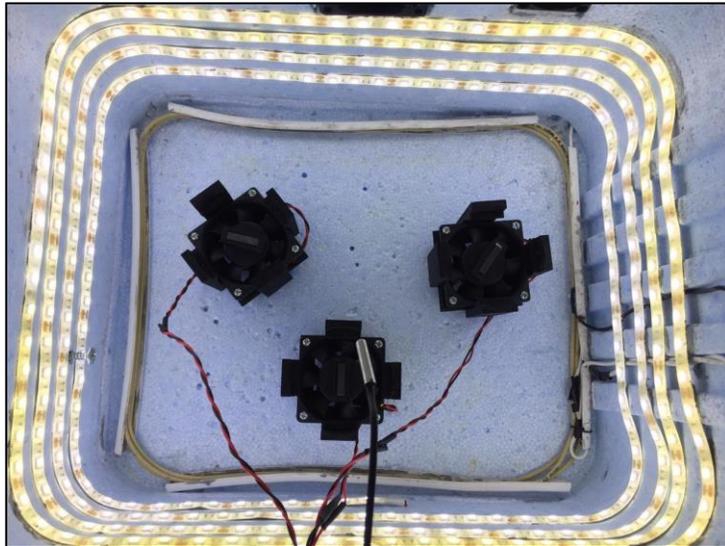


Figura 34. Incubadora vista pre-lateral.



Figura 35. Incubadora y programa para evaluar el crecimiento celular por absorbancias.



**ANEXO F.
DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA.**

