

ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS EN COLOMBIA

FRANCISCO CAMPILLO MACHADO
fcampill@eafit.edu.co

Resumen

Hoy, mucho más que antes, es común escuchar en los medios de comunicación, las universidades, el sector empresarial, los entes gubernamentales, entre otros, las palabras *investigación y desarrollo*, o también el término 'I + D', y *biotecnología*. Escuchamos también que las empresas invierten grandes capitales en sus departamentos de investigación, que los gobiernos destinan más recursos como porcentaje del PIB hacia las entidades dedicadas a estos fines y las universidades establecen alianzas con los sectores público y privado en busca de generar desarrollo de nuevas tecnologías. Se dice también que los negocios del futuro y las grandes ganancias se encuentran en el sector de las nuevas tecnologías y el biodesarrollo, producto de la implementación de áreas destinadas a la investigación. Es por ello que estos procesos son guardados con sumo secreto, hacen parte de los archivos más confidenciales que pueda tener entidad alguna. Este trabajo busca acercar al lector hacia el conocimiento de una de las muchas y posibles nuevas tecnologías, dar a conocer aspectos detallados de uno de los desarrollos más completos que a futuro podamos encontrar en la innovación biotecnológica, que son los productos derivados de las microalgas por su sostenibilidad ambiental y social, dando a conocer de manera sencilla qué son las microalgas, qué se necesita para implementar una producción de las mismas y si es factible hoy dar una apuesta hacia una de las biotecnologías más promisorias en un futuro cercano.

Palabras claves: Microalgas, Piscina, Biorreactor, Biomasa, Inversión.

Abstract

Today, more than ever before, it is common to see in the media, academia, business, government agencies, among others, the words Research and Development and also the term 'R & D' and Biotechnology. We also see that companies invest significant resources in their research departments, governments allocate more efforts as a percentage of GDP and organizations dedicated to these purposes and universities establish partnerships with the public and private sectors seeking to generate development in new technologies. It is also said that the future business and big profits are the field of novel technologies and product implementation as a result of bio-development. This is the reason why these processes are stored in extreme secrecy, and also considered confidential. This paper seeks to present to the reader the available knowledge of one of the many potential new technologies: microalgae to biofuels and products. Detailed aspects of one of the most comprehensive developments in the future will be discussed with emphasis on the environmental sustainability of this novel technology.

Keywords: Microalgae, Pool, Bioreactor, Biomass, Investment.

Introducción

Son varios los desafíos que deberemos afrontar todos sin excepción en la próxima década. Las crisis medioambiental, energética, de seguridad alimentaria y de salud que amenazan incluso nuestra propia existencia han hecho que sectores gubernamentales, empresariales y en especial académicos se planteen posibles soluciones a esos desafíos, desarrollando programas de investigación tendientes a generar desarrollo.

Uno de los retos que más genera debate es la competencia por producir alimentos o generar energía, y es que muchos de los insumos para producir alimento dependen del petróleo que presenta una tendencia al alza y a la escasez; las otras fuentes de energía como los biocombustibles compiten por tierra productiva y agua, y con una población mundial en aumento estos dos recursos son indispensables para nuestra supervivencia, por eso se hace necesario enfocar los esfuerzos en generar proyectos de investigación y desarrollo en busca de soluciones en estos sectores.

Una tecnología muy promisorias para dar solución en estos dos campos es el desarrollo de productos derivados de las microalgas. Estos organismos permiten la elaboración de biocombustibles, producir alimento animal y productos farmacéuticos como Omega-3 y complejo B, por sus concentraciones en aceite, proteínas y carbohidratos. La mayor ventaja que ofrecen las microalgas es que no compiten por la tierra productiva para cultivar alimentos ya que se pueden producir en tierras áridas, tampoco compiten por agua para consumo humano, animal y agrícola, y son ambientalmente sostenibles porque no generan residuos. Todas estas ventajas hacen que sean consideradas como biocombustibles de tercera generación.

Nuestro país ofrece un sinnúmero de ventajas desde el punto de vista medioambiental; la posición geográfica, la estabilidad y el crecimiento económico hacen que tengamos condiciones ideales para la creación de este tipo de proyectos, por eso es importante analizar la prefactibilidad para la implementación de una planta de producción de biomasa a partir de microalgas en Colombia estudiando aspectos técnicos, legales, financieros, condiciones de mercado e infraestructura que permitan dar a conocer este tipo de iniciativas de forma sencilla a las personas rompiendo un poco los esquemas de confidencialidad con que se manejan los proyectos de base tecnológica. Esas son algunas de las apuestas para que este trabajo tenga sentido.

El ejercicio investigativo de este trabajo se enfoca en métodos cuantitativos porque se enmarca en aspectos técnicos y científicos analizando diversos conceptos para la construcción de soluciones cuantificables necesarias para alcanzar los objetivos del trabajo.

La base de la elaboración fueron varios artículos académicos obtenidos a través de bases de datos de la Universidad Eafit, como Compendex /EngineeringVillage, ScienceDirect, ProQuest, CONSTRUDATA.COM, Google Scholar, que dan acceso a los artículos de los investigadores más importantes en el tema específico de las microalgas, tales como Yusuf Chisti, con sus conceptos de productividad de las microalgas, y Becker, con el análisis de sus propiedades. En los temas financieros, se utilizaron los conceptos aprendidos en el transcurso de la maestría, la experiencia de la universidad en los temas económicos, libros en evaluación de proyectos, en la propuesta de conceptos en ingeniería, la experiencia y los conocimientos propios adquiridos a lo largo del desarrollo de la vida profesional. También fueron muy importantes los datos recolectados a través de entidades como el Banco de la República, la Superintendencia de Industria y Comercio, la FAO y Bancolombia.

Las herramientas utilizadas, fueron Microsoft Excel, para el construir la plantilla del modelo financiero; Word en la escritura del trabajo; en las comunicaciones con el asesor temático, que se encuentra en Estados Unidos, Internet, correo electrónico y medios audiovisuales, y entrevistas personales con el asesor metodológico.

En el presente informe se pueden encontrar diversos temas técnicos como las propiedades físicoquímicas de las microalgas, la descripción de las algas como fuente de biomasa, la comparación con otras fuentes de biomasa; de ingeniería, la descripción de la infraestructura, los equipos, el sistema de producción; también, el análisis de las variables de factibilidad, el recurso humano, el modelo financiero y los aspectos legales, entre otros.

1 Capítulo 1. Propiedades de las microalgas

En este primer capítulo estudiaremos qué son las microalgas, cómo se convierten en objeto de investigación, qué tipos existen, cuáles son sus propiedades, cuáles son sus ventajas frente a otras fuentes de biomasa. Este capítulo se estructuró con la ayuda de artículos académicos producto de investigaciones realizadas por diversos expertos en el tema y que nos darán una idea muy clara de lo que son las microalgas.

1.1 Descripción de las de propiedades de fisicoquímicas de las microalgas

El estudio de las microalgas como fuente alterna de energía surge en los años cincuenta del siglo pasado, cuando el doctor Willam Oswald se preocupó por los diferentes problemas que debe afrontar el ser humano, como el tratamiento eficiente de aguas residuales, el desarrollo sostenible de productos alimenticios y la generación de energía amigable con el medio ambiente. Los estudios iniciales con las microalgas se centraron en el tratamiento de aguas residuales, debido al gran potencial que tienen estas en los procesos de captura de nutrientes como fósforo (P) y nitrógeno (N) presentes en las aguas residuales así como el CO₂ presente en el ambiente.

Las microalgas son organismos de diferentes tipos. Las unicelulares están compuestas por una célula y las pluricelulares por varias células dando formas y tamaños más grandes y diferentes. De acuerdo a su naturaleza, las microalgas pueden reproducirse en agua marina, agua salobre y agua dulce como lagos, ríos o embalses. Estos microorganismos son fotosintéticos, es decir, transforman material inorgánico en material orgánico usando la luz solar como fuente de energía. Las microalgas se desarrollan muy bien en aguas con concentraciones elevadas de fósforo, nitrógeno, potasio (K), además de dióxido de carbono (CO₂) y es allí donde radica la

importancia en la investigación y desarrollo de las microalgas, que además de ser una fuente alterna para la producción de biocombustibles, productos estéticos y alimentos, entre otros, sirven como herramienta para la reducción de emisiones de CO₂.

Varias especies de microalgas tienen alto contenido de proteínas y aminoácidos indispensables para la alimentación del ser humano. Las microalgas son ricas en lípidos, glucosa y carbohidratos, entre otros, y se calcula que la concentración de lípidos está entre 1% y 70%, los cuales pueden alcanzar el 90% de su peso seco en ciertas condiciones, según algunos estudios (Spoloare, Joannis-Cassan, Duran, & Isambert, 2006).

Los lípidos de las microalgas están compuestos por diferentes ácidos grasos como glicerol, grasas saturadas e insaturadas con las cuales es posible producir aceites Omega-3, Omega-6, y también vitaminas A, C, E y complejo B. La producción de todos estos componentes varía de acuerdo a las condiciones medioambientales donde se desarrolle el cultivo.

1.2 Descripción de algunas microalgas para la producción de biomasa

1.2.1 Espirulina

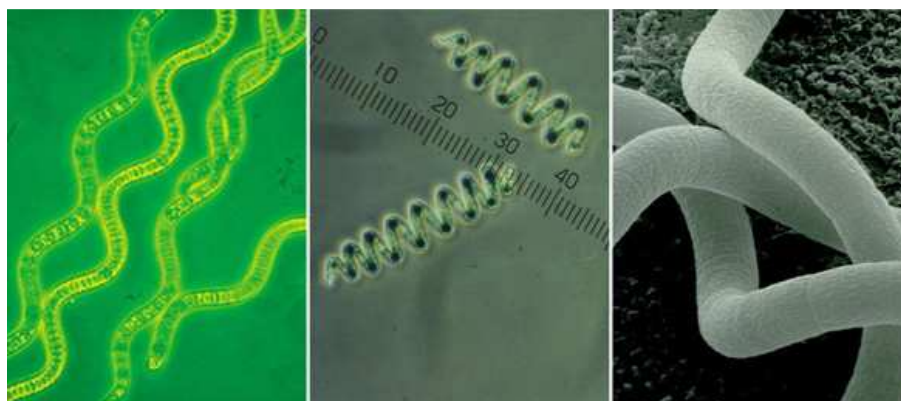
La espirulina es uno de los grupos de microalgas más conocidos e investigados en el mundo. Estas son consideradas cianobacterias, caracterizadas por ser procariotas, es decir, que no poseen una estructura interna o núcleo definido. También son autótrofas porque pueden producir su propio alimento y son de carácter pluricelular. Su tamaño oscila entre 20 y 200 micrómetros de largo en forma espiralada. Se han detectado más de 40 clases de microalgas de la familia espirulina y entre las más importantes se encuentra la *Spirulina máxima* y *Spirulina platensis*. Uno de los mayores riesgos que tiene el cultivo de las microalgas es que estas pueden

ser atacadas por otros microorganismos que no permiten su crecimiento, lo que afecta la productividad de los cultivos. La espirulina ha demostrado ser uno de los organismos con menor susceptibilidad a ataques de diversos microorganismos debido a que puede ser cultivada en aguas con pH alto (entre 8 y 10). La temperatura óptima para su cultivo puede oscilar entre los 25° y 35 °C (grados Celsius) aunque puede resistir temperaturas por debajo de los 15 °C.

La espirulina ha sido muy estudiada con fines alimenticios para el ser humano por el alto valor nutricional que contiene como porcentaje de su peso. Se destacan proteínas hasta un 60%, carbohidratos y grasas. Contiene también fósforo, calcio, potasio, magnesio y hierro entre algunos otros. Según el Foro Económico Mundial, uno de los diez riesgos que afrontará la humanidad en los próximos diez años es la desertificación alimentaria. Una de las formas para combatir los riesgos alimentarios por consecuencia de los cambios medioambientales y la competencia con la producción de energía es el desarrollo de los cultivos de microalgas, en especial de la espirulina para hacer parte de la dieta alimenticia.

El uso de la espirulina es milenario, en muchas culturas ha sido utilizado como fuente de alimento y en la actualidad es muy difundida en el sudeste asiático, Japón y Estados Unidos.

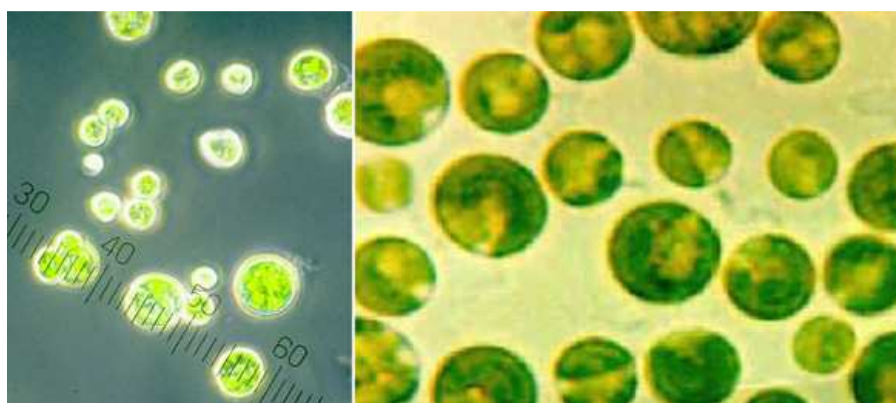
Figura 1. Espirulina



Fuente:<http://www.algaeindustrymagazine.com/special-report-spirulina-part-1-origins-and-biology/>

1.2.2 Chlorella

Otra de las clases de microalgas existentes es la Chlorella, dentro de este tipo de microalgas está la *Chlorella vulgaris*, un alga unicelular que se desarrolla en agua dulce y muy común en aguas residuales. A diferencia de la espirulina es de forma redondeada y mide aproximadamente entre 2 y 6 micrómetros, la temperatura para su crecimiento óptimo oscila entre 25 y 35 grados Celsius. Su contenido proteico oscila alrededor del 51 al 58 % como porcentaje de su peso; carbohidratos, un 12 a 17% y lípidos de 14 a 22 %. (Becker, 2007)
(Becker, 2007)

Figura 2.Chlorella

Fuente:<http://www.algaeindustrymagazine.com/special-report-spirulina-part-1-origins-and-biology/>

La siguiente tabla muestra algunos tipos de microalgas y sus propiedades.

Tabla 1. Propiedades de microalgas

Alga	Proteína	Carbohidratos	Lípidos
Anabaena cylindrical	43-56	25-30	4-7
Aphanizomenon flos-aquae	62	23	3
Chlamydomonas reinhardtii	48	17	21
Chlorella pyrenoidosa	57	26	2
Chlorella vulgaris	51-58	12-17	14-22
Dunaliella salina	57	32	6
Euglena gracilis	39-61	14-18	14-20
Porphyridium cruentum	28-39	40-57	9-14
Scenedesmus obliquus	50-56	10-17	12-14
Spirogyra sp.	6-20	33-64	11-21
Arthrospira maxima	60-71	13-16	6-7
Spirulina platensis	46-63	8-14	4-9
Synechococcus sp	63	15	11

Fuente: Becker, 2007.

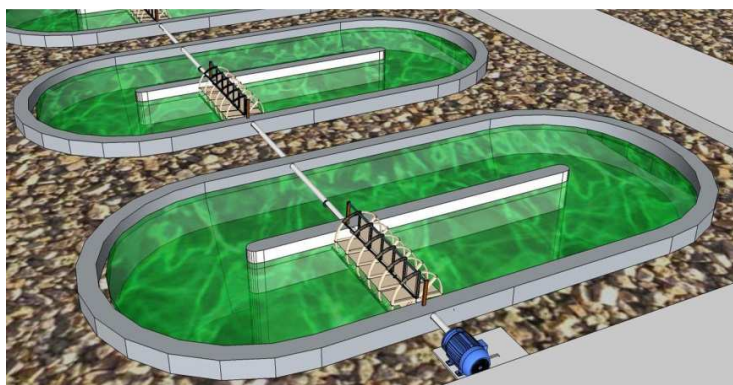
1.3 Las microalgas como fuente de biomasa

Una definición de lo que podría ser biomasa es toda aquella materia orgánica que puede transformarse en energía, por lo tanto la basura, la madera, la caña de azúcar, el maíz, la soja, la remolacha, la jatropha, los desechos de animales entre otros productos, son materia prima para la producción de energía, como biodiésel, biocombustible o biogás y que han sido ampliamente estudiados.

La biomasa de microalgas se obtiene de dos formas básicamente.

La primera es por medio de piscinas o estanques, la cual consiste en cultivar las microalgas en unas piscinas abiertas, el tamaño de la piscina dependerá de la productividad que se desee alcanzar, por lo general la profundidad de las piscinas debería estar entre 50 y 70 cm para garantizar que todos los microorganismos reciban la luz del sol, su principal alimento (fotosíntesis), y puedan desarrollarse.

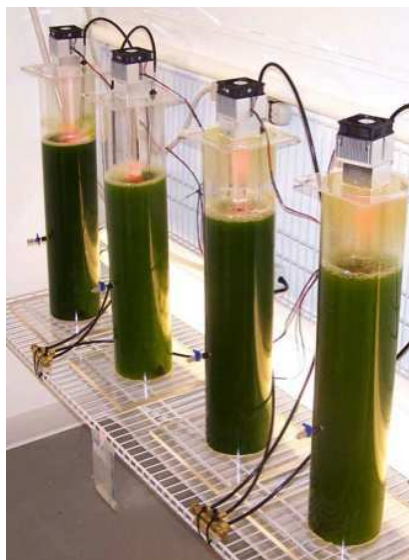
Las piscinas son de forma rectangular con terminación circular, en el centro tienen un muro divisorio para orientar el sentido del flujo, contienen unas aspas giratorias, que constantemente agitan el agua, de esta manera se garantiza la oxigenación del agua, evitar el asentamiento de las microalgas y, lo más importante, que reciban la luz del sol. La figura 3 muestra la forma y partes de una piscina de microalgas.

Figura 3. Piscina de microalgas

Fuente: Elaboración propia.

Una segunda opción para la producción de biomasa de microalgas es a través de biorreactores. Los biorreactores son tubos transparentes que ayudan a concentrar a luz del sol o, en otros casos, luz artificial para favorecer el crecimiento de las microalgas. Estos sistemas tienen algunas ventajas sobre las piscinas abiertas ya que al ser cerrados tienen una reducción en cuanto a la contaminación del cultivo por ataques bacterianos y permiten controlar con mayor facilidad las propiedades de las microalgas y la concentración de nutrientes necesarios para su desarrollo. La gran desventaja que presentan los biorreactores frente a las piscinas abiertas son los altos costos de construcción, fabricación y operación (FAO, 2012).

Figura 4. Biorreactor



Fuente: <http://www.algaeindustrymagazine.com/algae-scale-up-bioreactors-from-biovantage-resources-inc/>

1.3.1 Obtención de la biomasa

Para obtener la biomasa de microalgas posterior a su cultivo, podemos hablar básicamente de dos métodos que son los más usados actualmente, la sedimentación y el centrifugado. Cabe que resaltar que los métodos de extracción de las microalgas hoy son motivo de investigación.

El primero de ellos es la sedimentación y consiste básicamente en que una vez las microalgas alcanzan su crecimiento, por su peso se asientan en el fondo. Este es un proceso económico, pero es lento y de rendimiento bajo. La biomasa obtenida de este proceso es muy voluminosa y bastante húmeda.

El segundo método de extracción es la centrifugación, la cual consiste en separar la materia sólida del agua, con procesos rotativos de alta velocidad donde la fuerza interna supera la

gravedad y hace que las microalgas se asienten en el fondo. La ventaja de este método es la alta reducción en contenido de agua en la biomasa. El centrifugado para obtener la biomasa eleva los costos de producción ya que requiere la inversión en un equipo de centrifugado y costos operacionales en consumo de energía y mantenimiento del equipo.

El producto obtenido después de la extracción es lo que se conoce como biomasa, la cual se puede transformar o utilizada como materia prima para la elaboración de diversos productos como biocombustible, alimento animal, alimento humano y productos cosméticos.

La biomasa de microalgas puede contener hasta 70% o más de su peso seco en lípidos.

1.4 Comparación de las microalgas con otras fuentes de biomasa

Las formas tradicionales de obtención de biomasa para la producción de biodiésel, etanol o biocombustibles que hasta ahora tienen mayor comercialización son las provenientes de la caña de azúcar, el maíz, la soja, la palma africana, jatropha, tres de los cuales son base para el consumo de productos de consumo humano. Y este, podríamos decir, es uno de los primeros desafíos que tiene el ser humano a futuro, la decisión entre producir alimentos o energía.

La población mundial ha venido aumentando y según la FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) será necesario un aumento de 60% en la producción de alimentos con respecto a los años 2005-2007 para atender la demanda de población (FAO, 2012). Por lo tanto, si las áreas cultivables son utilizadas para satisfacer la demanda energética, la cual también aumenta con la población, difícilmente se podrá garantizar el acceso a la alimentación de una parte de la población mundial, en especial los países de menores ingresos, lo cual ya es una realidad en varios sectores de África.

Y es esta una de las principales ventajas de la biomasa de microalgas para la producción de energía (biocombustible), ya que no son un producto base para la producción de alimentos de consumo humano, esta característica ha llevado a considerar los biocombustibles provenientes de microalgas como de segunda generación.

Otro punto importante de las microalgas es que no necesitan áreas de tierra fértil, esto disminuye considerablemente la tala de árboles y la deforestación de bosques nativos, que se da en los casos del maíz, la palma africana, la jatropha entre otros. De hecho algunas de las empresas estadounidenses pioneras en la investigación y producción de biocombustible con microalgas están ubicadas en Baja California, Arizona y Nuevo México, caracterizadas por climas muy secos, áridos de formación desértica. Los cultivos de microalgas requieren menos hectáreas de tierras (en una proporción de 1/10) que la palma de aceite. Además, ofrecen un rápido desarrollo ya que en un plazo entre 10 y 15 días alcanzan su desarrollo, mientras las demás clases de cultivo duran meses incluso años para alcanzar su rendimiento en producción.

Comparativamente, una de las desventajas que podríamos afirmar que poseen los cultivos de algas es la cantidad de agua empleada.

La tabla 2 muestra un estudio realizado en Estados Unidos en el que se comparan diferentes fuentes de biomasa en términos de área necesarios para abastecer el 50% de la demanda de biodiésel para el transporte de ese país. Allí se puede observar que las microalgas con un porcentaje del 30% de su peso en aceite son 300 veces más productivas que el maíz, 130 veces más que la soja y 30 veces más productivas que la jatropha. Estos valores muestran el gran potencial de las microalgas como materia prima para la sustitución de productos de base alimenticia para la producción a gran escala biocombustibles como un sustituto del petróleo.

Tabla 2. Comparación entre fuentes de biodiésel

CULTIVO	RENDIMIENTO DE ACEITE (litros/hectáreas)	ÁREA DE CULTIVO REQUERIDA (Mha)^a	PORCENTAJE DEL ÁREA CULTIVABLE EN EUA^a
Maíz	172	1540	846
Solla	446	594	326
Canola	1190	223	122
Jatropha	1892	140	77
Coco	2689	99	54
Aceite de palma	5950	45	24
Microalga ^b	136900	2	1,1
Microalga ^c	58700	4,5	2,5

a = Para abastecer el 50% del total de las necesidades de combustible del transporte en EUA.
b = 70% de aceite (por peso) en Biomasa.
c = 30% de aceite (por peso) en Biomasa.

Fuente: Chisti, Biodiesel from Microalgae, 2007.

2 Capítulo 2. Planteamiento de la ingeniería básica

Este capítulo tiene como propósito dar un planteamiento de una ingeniería básica que permita conocer aspectos importantes para la implementación de una planta de producción de biomasa teniendo como materia prima las microalgas, desde las necesidades de la infraestructura a implementar, el proceso y los equipos necesarios en el desarrollo de este tipo de proyectos.

2.1 Descripción de la infraestructura

2.1.1 Terreno

Como se mencionó en el capítulo 1, no es necesario que las tierras o el terreno para la implementación de una planta de producción sean productivas, pueden ser suelos de característica seca. Sí es muy importante que sea un lugar donde se garanticen tres condiciones básicas:

La primera condición es tener acceso a fuentes hídricas, las cuales pueden ser captadas de algún afluyente hídrico natural como ríos, lagos, mar, agua lluvia o pozos subterráneos. También pueden ser aguas residuales que podrían funcionar muy bien debido a su elevado contenido de nutrientes, pero la mayor complicación de estas aguas son los altos niveles de olor y residuos que puedan causar alguna afectación al ser humano.

La segunda condición necesaria para determinar las características del terreno son las condiciones de temperatura, idealmente regiones cuya temperatura oscile entre 25 °C y 35 °C. En nuestro país, por tener una excelente ubicación geográfica, varias regiones cuentan con zonas ideales para la implementación de una planta para el cultivo de algas. Los departamentos de Cesar, Bolívar o Atlántico; el Urabá antioqueño o el Valle del Cauca podrían pensarse como

sitios estratégicos, no solo por el clima sino también por el desarrollo en infraestructura que se tiene pensado a corto y mediano plazo por parte del gobierno central.

La tercera condición es la luminosidad, es decir, la cantidad de energía solar expresada en Kilovatios/hora (kw/h). Las microalgas son organismos cuya principal fuente de alimento es la energía solar, por lo tanto mientras más horas de luminosidad se presente es mucho más benéfico para su desarrollo.

A nivel topográfico, se recomiendan terrenos planos o “sempiplanos” con pendientes que no superen el 2%, aunque algunas pendientes se pueden utilizar para los procesos de circulación y recirculación de agua entre las piscinas.

La extensión mínima para pensar en una planta de producción debería ser aproximadamente de una hectárea (1 Ha).

Figura 5. Granja de producción Sapphire Energy, Columbus, Nuevo México- EUA



Fuente: www.sapphireenergy.com

2.1.2 Las piscinas

Las piscinas pueden ser construidas directamente excavando en las dimensiones consideradas en el diseño, protegiendo las paredes y el suelo con membranas impermeables en polietileno de alta densidad que impida la filtración de agua. En el medio de la piscina y en la dirección más larga debe ser construido un muro divisorio con la función de orientar la dirección del flujo, este muro puede ser construido con bloque de arcilla o concreto en el número de hiladas necesarias de acuerdo a la profundidad de la misma. La función del muro también es la de soportar el eje de las aspas que dan movimiento al agua. El número de piscinas dependerá de la cantidad de toneladas de biomasa de microalgas que se vayan a producir.

La descripción anterior es la más utilizada para piscinas de gran tamaño por la facilidad y costo. Para piscinas más pequeñas son utilizadas piscinas hechas en fibras tipo bañeras.

2.1.3 Biorreactores

Los biorreactores son estructuras por lo general de forma cilíndrica cuyos tamaños varían según especificaciones así como su diseño y color. Por lo regular son fabricados en acrílicos, polietileno de alta y baja densidad y vidrio.

Los biorreactores tienen entrada de gases como dióxido de carbono, nutrientes (nitrógeno, fósforo, etc.), y cuentan con sensores de temperatura, pH, luminosidad entre otros.

2.1.4 Bodega de producción

La bodega de producción es donde estarán todos los equipos necesarios para la producción de la biomasa y la transformación de la misma como materia prima para la producción de biocombustible o productos farmacéuticos o alimento animal.

La bodega es una estructura aporricada construida en columnas de concreto o metálicas con vigas superiores de amarre, techo a dos aguas con tejas termoacústicas; su cerramiento se puede hacer en bloques de concreto o con paneles metálicos tipo sándwich con poliuretano de alta densidad en el medio, también se pueden emplear materiales como elementos prefabricados, tilt up, entre otros, que por costo y proceso constructivo sean los más viables. Los pisos deben ser en concreto, con una resistencia $f'c = 245 \text{ kg/cm}^2$, espesor (e) = 15 cm; el área de la bodega (375 m^2 aproximadamente), se debe adecuar también un espacio para oficinas y almacenaje.

2.1.5 Laboratorio

El laboratorio también puede ser construido en bloque o elementos prefabricados, el área aproximada puede ser de 30 m^2 , espacio suficiente para equipos y enseres que debe llevar el laboratorio.

Estos son los aspectos principales que se deben tener en cuenta para la implementación de una planta de producción de biomasa de algas. Existen muchos más detalles, pero ya corresponden a los casos particulares que se dan en el desarrollo de una ingeniería de detalle.

2.2 Descripción del proceso

Los procesos de producción para la obtención de biomasa de microalgas son, normalmente, secuenciales. Producir grandes volúmenes de biomasa debe ser un proceso muy estandarizado, lo cual se puede lograr a través de un proceso lineal controlado por equipos, donde el personal operativo puede realizar tareas sencillas e inspecciones básicas. Esto es lo que se conoce en el campo de la producción como un sistema acompasado por equipos, sin embargo no podemos desconocer que la primera etapa del proceso –el cultivo de las microalgas–, la

determinación de su productividad según sea la especie, así como investigación continua en las diferentes especies, son un proceso que depende mucho del factor humano, por lo tanto la primera etapa del sistema de producción es un sistema muy operativo y no tanto por equipos.

Veamos, entonces, algunos puntos importantes en el proceso para la producción de biomasa de algas.

2.2.1 Recepción y almacenamiento de las microalgas

Las primeras cepas de microalgas deberán ser importadas desde los Estados Unidos, ya que estas especies cuentan con mayores estudios en cuanto a productividad y comportamiento, mientras las cepas nativas o locales no han sido tan estudiadas. Para el ingreso al país, las cepas deberán contar con todos los permisos legales y ambientales exigidos por la ley colombiana, de lo cual hablaremos más adelante. Una vez lleguen las distintas cepas de microalgas, estas deberán ser conservadas en habitáculos refrigerados como neveras o refrigeradores especializados, este procedimiento es necesario para evitar la degradación de las microalgas. El período de refrigeración depende solamente del inicio del proceso de reproducción.

2.2.2 Escalamiento

El escalamiento es una reproducción primaria, en la cual se hace la preparación de un medio de cultivo que es agua con nutrientes en equipos de laboratorio totalmente esterilizados y en la cual se introducen las cepas de microalgas para que inicien su proceso de reproducción y crecimiento. El volumen del medio de cultivo es aproximadamente el 10% del volumen total de la producción deseada, es decir, si el cultivo de microalgas está calculado para 10 m^3 el medio de cultivo se inicia con 1 m^3 . Cabe aclarar que los equipos necesarios para la preparación del medio de cultivo son proporcionales al volumen de producción.

2.2.3 Crecimiento y reproducción

Una vez se alcanza el 10% aproximado de volumen de microalgas, se procede con el traspaso del cultivo al medio en que se reproducirá y alcanzará un crecimiento óptimo.

Recordemos que hemos hablado de dos sistemas básicamente, el primero un sistema abierto que son las piscinas y el segundo un sistema cerrado que son los biorreactores. Para ambos casos, entonces, se deberán tener contruidos bien sea el biorreactor o las piscinas con el medio de cultivo (agua, fósforo, potasio, nitrógeno) y tener instalados los sensores de temperatura, pH, así como el sistema de agitación.

2.2.4 Recolección o cosecha

Luego de que las microalgas han alcanzado su crecimiento y contienen el porcentaje de aceite en términos de su peso seco, determinado según los estudios previos de caracterización, se procede a la recolección de las microalgas en una piscina de cosecha a donde se envía todo el medio de cultivo. Esta recolección se puede hacer por medio de drenaje o por un sistema de bombeo.

2.2.5 Separación

La separación es el proceso por el cual las microalgas se separan del agua. Este paso puede hacerse por varios métodos. El primero y más efectivo es el centrifugado, se toman las microalgas, se introducen en la centrifugadora y con velocidades superiores a la gravedad, el agua cae y queda la biomasa de algas. El otro paso es la floculación en la cual al agua se le adiciona un floculante que hace que las microalgas se aglutinen y de esta forma son recogidas con mallas. El proceso faltante es el asentamiento en el cual las microalgas se asientan y posteriormente son recogidas. Estos dos métodos tienen una desventaja frente al centrifugado y

es la cantidad de agua que queda contenida en las microalgas, ya que la extracción mecánica es más eficiente en el retiro de la misma.

El agua sobrante posterior a la separación debe ir a un estanque para a ser tratada y que pueda volver al proceso y servir como medio de cultivo. Recordemos que los procesos de cultivo consumen bastante agua y como política medioambiental y económica se deben tener procesos muy optimizados.

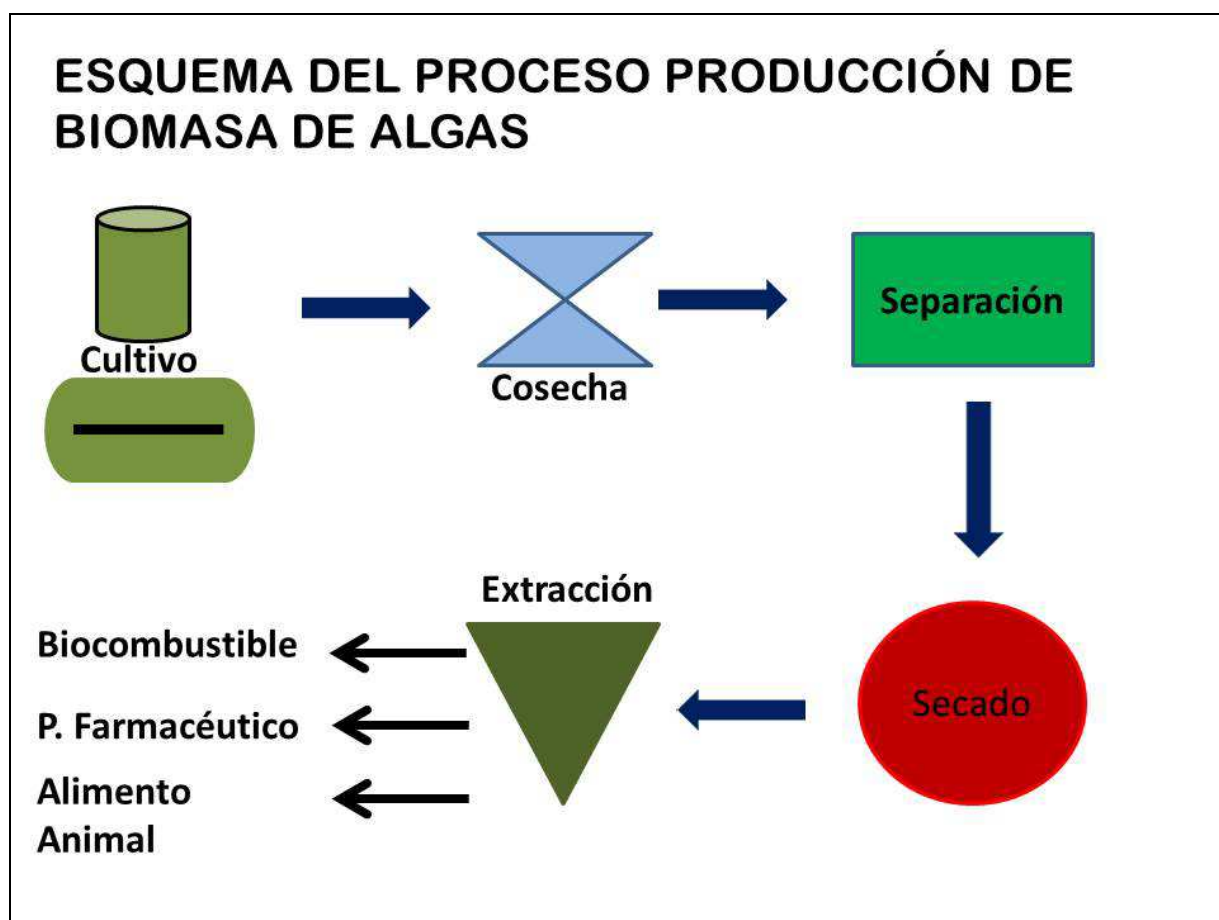
2.2.6 Secado

El secado de la biomasa de las microalgas, consiste en retirar el exceso de agua presente en las algas por diversos medios, hornos de bandejas, secadores de rodillos, tipo spray, de cinta, entre algunos otros. El secado consiste básicamente en colocar la biomasa húmeda en las bandejas e introducirlas en los hornos a una temperatura promedio de 60 °C. El producto obtenido es una biomasa seca con alta concentración de lípidos.

2.2.7 Extracción

La biomasa es sometida a un proceso de extracción ya sea mediante prensado mecánico o el uso de solventes como cloroformo y hexano o una combinación de ambos. De este proceso se obtienen dos compuestos, uno con alto contenido de aceite y el otro principalmente de proteínas y carbohidratos (azúcares). El producto final obtenido se puede entonces transformar en biocombustible, productos farmacéuticos o alimento animal.

Figura 6. Esquema del proceso producción



Fuente: Elaboración propia.

2.3 Descripción de equipos

Para la implementación de una planta de producción de biomasa, los equipos juegan un papel fundamental como lo vimos anteriormente, por lo tanto seleccionar los adecuados puede garantizar un mejor desarrollo de la planta. A continuación describiremos algunos de los equipos necesarios en el proceso.

2.3.1 Centrifugadora

La centrifugadora es una máquina que permite separación del agua de la biomasa permitiendo que esta se separe por medio de la rotación y la acción de la fuerza centrífuga que reemplaza la fuerza de gravedad. En las centrifugadoras modernas se puede superar diez mil veces la fuerza de la gravedad según algunos fabricantes. La capacidad del equipo para un proyecto de productos derivados de microalgas dependerá de la cantidad de biomasa que se desee procesar expresada en términos de volumen/tiempo (m^3 , l gal / h, m, seg). En el mercado se encuentran diversos fabricantes como Alfa laval, Flottweg, Peralisi, Ceba, entre otros. También encontramos fabricantes para centrifugas más pequeñas que son de uso de laboratorio necesarios para este tipo de proyectos.

Los procesos de separación se pueden hacer por medio de filtro prensas que separan la cantidad de líquido del sólido por medio de un prensado mecánico, reteniendo los sólidos por medio de lonas o mallas dentro del equipo. Algunas empresas ya están diseñando separadores especializados exclusivos para microalgas.

2.3.2 Hornos

Los hornos utilizados en los procesos de microalgas son hornos de secado, que como se mencionó anteriormente cumplen la función de retirar el exceso de agua presente en la biomasa. Es importante, como en todos los equipos, revisar la potencia para verificar el consumo de energía, la capacidad, el ingreso de la carga entre otros.

Los tipos de hornos que pueden ser usados en el secado de las microalgas son los siguientes:

2.3.2.1 Horno de bandejas

Es el horno convencional con compartimientos internos para la colocación de bandejas sobre las cuales se coloca la biomasa, el tiempo de secado se establece de acuerdo a la potencia del mismo, en el mercado se encuentran diversas marcas y tamaños, algunos ofrecen entre 140 y 150 kg por hora, se recomienda su uso para producciones pequeñas.

2.3.2.2 Hornos rotativos

Son hornos horizontales, en acero fundido en su parte exterior y material refractario por dentro, tienen una entrada de calor y una salida de gases, son de gran tamaño y son ideales para producción de gran escala, los tamaños del diámetro y longitud varían de acuerdo a la producción.

2.3.2.3 Hornos Spray (atomización)

Muy utilizados en la industria del sector alimenticio, su funcionamiento consiste en una cámara cerrada, a la cual se ingresa aire caliente, la biomasa de microalgas es atomizada por medio de microgotas mediante un disco rotativo, esto permite que al entrar en contacto con aire caliente el exceso presente en la biomasa se evapore y el producto salga seco.

Estos son algunos tipos de hornos que pueden ser utilizados en el proceso de la producción de biomasa con microalgas. En el mercado existen muchos otros que pueden ser probados en estos procesos.

2.3.3 Prensa mecánica

La prensa mecánica es ampliamente usada para la extracción de aceite de algunas semillas con alto contenido del mismo, tales como soja, maní, maíz, entre otras.

Estos equipos aplastan o muelen la biomasa de las microalgas hasta extraer su aceite, el cual antes de salir pasa por mallas filtrantes para garantizar su calidad; por otro lado sale el residuo sólido que, recordemos, es usado como materia prima para la producción de alimento animal.

En el mercado se ofrecen diversos tipos de prensa según capacidad o diseño, siempre tendientes a garantizar la calidad del aceite extraído, por lo tanto, en algunas prensas la biomasa es prensada tan pronto ingresa en la máquina, en otras la biomasa viaja a través de tornillos sin fin y es prensada al final del ciclo. El diseño, capacidad, marca de la prensa dependerá directamente de los cálculos y diseños que se tengan para la cantidad de biomasa que se desee producir.

2.3.4 Otros

La tabla 3 muestra otros equipos necesarios en la implementación de una planta de producción con microalgas, en su mayoría son equipos de laboratorio.

Tabla 3. Otros equipos

Equipo	Uso
Refrigerador	Laboratorio
Autoclave	Laboratorio
Campana de flujo laminar	Laboratorio
Instrumentación vidrio	Laboratorio
Campana de gases	Laboratorio
Microscopio	Laboratorio
Balanza	Laboratorio
Termómetros	Laboratorio
Medidores de pH	Laboratorio
Aire comprimido	General
Envasado y/o empacado	Producción
Motores	Producción
Equipos de bombeo	Producción

Fuente: Elaboración propia.

3 Capítulo 3. Variables de factibilidad

En este capítulo final estudiaremos cuales son las variables que en un estudio inicial harían o no factible el proyecto, cuál sería el mercado donde se comercializaría la biomasa, qué tipo de mano de obra se requiere; analizaremos los aspectos legales en torno al proyecto y simularemos condiciones para el modelo financiero.

3.1 El mercado objetivo

A lo largo del trabajo hemos venido diciendo que la biomasa de microalgas es una materia prima que puede ser transformada en tres productos básicos, biocombustible, productos alimenticios animales y productos farmacéuticos. Por lo tanto la biomasa de microalgas se puede comercializar en dos compuestos; el primero, aceite y el segundo, afrecho o residuo que resulta después de la extracción del aceite, estos dos compuestos son materia prima para la elaboración de alguno de los tres productos mencionados anteriormente.

La pregunta entonces sería cuál es el mercado objetivo para la venta de compuestos de la biomasa de microalgas. Para responder la pregunta escogeremos dos de los posibles sectores que consideramos en Colombia como los más viables; el primero es el sector de los productores de materias primas para la elaboración de alimento animal, estas compañías venden sus productos a empresas de marca comercial las cuales producen los concentrados que comúnmente vemos en el mercado. El segundo son los productores de biocombustibles.

En el mercado de las materias primas para concentrados de animales, un estudio de la Superintendencia de Industria y Comercio afirma que el 90% de las materias primas en Colombia es importado y el 10% faltante es producido en el país (Superintendencia de Industria

y Comercio, 2011). El mismo estudio dice que el mercado está dividido en dos sectores, el primero corresponde a productores de maíz, soja, aceites, entre otros, y el sector secundario son las harinas de origen animal, salvado y cereales, otros compuestos que son importados son minerales, sales y vitaminas.

Las microalgas son ricas como fuente de proteína, lípidos y carbohidratos, por lo tanto uno de los mercados objetivos para la comercialización de la “torta” de microalgas y su aceite son todas aquellas empresas proveedoras de las empresas comerciales que elaboran alimentos balanceados para animales, en caso de que requiera algún proceso de transformación los compuestos derivados de las microalgas, o, directamente, las empresas comerciales. En un mercado cuya producción nacional solo asciende al 10% del total requerido, se puede garantizar que un producto de buena calidad ajustado a la industria tiene una alta probabilidad ser comercializado en un valor justo. La competencia en este sector son, primero, los productores agrícolas; segundo, las fabricantes de harinas provenientes de la matanza de animales; y, tercero, empresas comerciales del sector de alimentos que están experimentando procesos de integración vertical.

En cuanto a la comercialización del aceite de microalgas para ser transformado en biodiésel, la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia informó que el país produjo 973.000 toneladas de aceite crudo de palma en el año 2012, de las cuales se vendieron 439.000 toneladas para la producción de biodiésel que alcanzó una cifra de 489.991 toneladas. Las otras 534.000 toneladas se emplearon en la producción de aceite crudo y refinado, entre otros (Fedebiocombustibles, 2013).

El país cuenta con nueve refinadoras de aceite para biodiésel donde se producen los diferentes tipos de mezclas B10-B8-B2. Estas refinadoras serían el mercado objetivo para la venta del aceite de microalgas. Con la implementación del decreto 1135 de 2009, que regula el uso de alcoholes carburantes en el país, toda la producción nacional de biodiésel se concentró en abastecer la demanda interna, con una disminución sustancial de las exportaciones además de una necesidad de abastecer el país por la baja producción. El mercado del biodiésel está regulado por el gobierno nacional a través del Ministerio de Minas y Energía, el cual decreta su precio en un período de tiempo. El principal competidor en el sector son los productores de aceite de palma, agremiados en Fedepalma, desde donde se dictan la gran mayoría de decisiones y estrategias del sector. El precio del aceite de palma está regulado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Territorial.

La estrategia de mercado del aceite de microalgas debería centrarse en marcar diferenciación en la calidad de los parámetros entregados ya que estos influyen directamente en los costos de refinación y producción del biodiésel.

3.2 Aspectos legales

Dentro del marco legal para el funcionamiento de una planta de estas características son necesarios algunos permisos.

Lo primero es ser una empresa constituida bajo la normatividad colombiana en alguno de los tipos de empresa que se puede conformar (sociedad por acciones simplificada, anónima, limitada, etcétera). Desde el punto de vista ambiental se deben contar con una licencia ambiental otorgada por una Corporación Autónoma Regional (CAR) de acuerdo a la jurisdicción de

implementación del proyecto que hace las veces de autoridad ambiental competente. Los permisos otorgados deben estar ajustados estrictamente a las necesidades del proyecto.

Dentro de la licencia deben estar incluidos un permiso de concesión de aguas de acuerdo a lo establecido en el Decreto 1541 de 1978, en caso de que el agua utilizada para el proyecto sea captada de alguna fuente hídrica como río, quebrada o lago, por los altos consumos que requiere la operación es indispensable tener una concesión de aguas; si la captación es de agua subterránea, el permiso es para ello. También debe contar con un permiso de vertimientos si es necesario verter las aguas resultantes del proceso en algún cuerpo de agua, según el decreto 3930 de 2010.

De igual manera se debe tramitar el Permiso de Estudio con Fines de Investigación Científica en Diversidad Biológica (PEFIC) que incluye la recolección de cepas nativas y todo lo relacionado con la investigación propia del proyecto. En caso de ser requerido, según los alcances del proyecto, debe obtenerse permiso de acceso a recursos genéticos que permite la manipulación genéticas de diversas especies.

Para la importación de las microalgas se requieren los permisos de ingreso al país expedidos por el ICA, entidad encargada de verificar las condiciones de importación y dictar las medidas tendientes a preservar la sanidad agropecuaria, además, cumplir con la Resolución ICA 1277 de 2004.

3.3 Recurso humano

En el capítulo anterior explicamos dos factores importantes acerca del recurso humano, el primero, que el proceso investigativo depende en su gran mayoría de él, y el segundo, sería el

proceso de producción donde no es tan importante ya que el proceso se enfoca más a los equipos y las personas solo realizan tareas menores.

En ese orden de ideas la propuesta de implementación de la planta de personal para un proyecto de estas características estaría enfocada de la siguiente manera:

Un director de planta, dos tecnólogos operativos y un operario de cultivo.

3.3.1 Descripción de cargos

3.3.1.1 Director de planta

El director de planta deberá ser un biólogo o ingeniero químico o de procesos con dos o más años de experiencia en investigación, manejo y conocimiento de laboratorio y procesos en I+D. Esta persona tiene a su cargo tanto el proceso investigativo como la producción.

3.3.1.2 Tecnólogos operativos

Pueden ser técnicos o tecnólogos en química, mantenimiento electromecánico, biólogos. Las funciones básicas de uno es servir como asistente de laboratorio en función investigativa, y del otro, encargarse del funcionamiento y mantenimiento de equipos, piscinas y demás.

3.3.1.3 Operario de cultivo

El operario de cultivo puede ser bachiller o técnico, se encargará de todo el mantenimiento de las piscinas o biorreactores, cultivo de las microalgas, recolección inyección de nutrientes, entre otros.

3.4 Modelo financiero

A continuación describiremos algunos de los parámetros más importantes sobre los cuales se elaboró el modelo financiero. La herramienta utilizada es una plantilla de Microsoft Excel. El resultado esperado está basado en la Tasa Interna de Retorno (TIR) evaluado para un período de 10 años y el VPN del proyecto, dado que las expectativas de esta tecnología de tener productos derivados de las microalgas están proyectadas para principios de la próxima década.

El modelo incluyó diferentes flujos de caja: el de operación donde se proyectan la producción, las ventas y la operación, el flujo de caja de inversión inicial que da como resultado el flujo de caja del proyecto

3.4.1 La capacidad de producción

La capacidad de producción está determinada por la cantidad de gramos por metro cuadrado al día ($\text{g/m}^2\text{-día}$) de cultivo que se pueda extraer de las microalgas, y sobre estos entonces se podrían plantear los escenarios pesimista, optimista y neutral. El modelo financiero está planteado tomando un rendimiento de las microalgas de $20 \text{ g/m}^2\text{-día}$ de biomasa, este es un rendimiento relativamente bajo, por lo tanto podríamos decir que esta productividad es un escenario desfavorable dentro de la evaluación del proyecto. Se prevé un incremento en el rendimiento de las microalgas igual al $5 \text{ g/m}^2\text{-día}$ por año hasta alcanzar un rendimiento de $60 \text{ g/m}^2\text{-día}$ y un aumento de área a 1,5 Ha a partir del año 5. El desarrollo de la tecnología en el sector y las investigaciones propias permitirían alcanzar el rendimiento en el tiempo propuesto.

En capítulo anterior comentamos que un área mínima de producción para un proyecto de biomasa debería ser igual a 1 Ha que equivale a 10.000 m^2 , la simulación será sobre un área neta

de producción igual a 10.000m^2 que será equivalente a tener 10 piscinas de cultivo en una dimensión de 100 m de largo x 10 m de ancho.

Ecuación 1. Determinación la productividad

$$Productividad = 20 \frac{g}{m^2 \text{ día}} * 10.000 m^2 = 200.000 \frac{g}{\text{día}} (1)$$

Para un año de 360 días, la productividad es igual a 72 toneladas de biomasa de microalgas.

3.4.2 La inversión inicial

La inversión inicial del proyecto es la suma de la compra de los terrenos, la construcción de la infraestructura y la compra de equipos.

La construcción de infraestructura corresponde a las piscinas, la bodega de producción y el laboratorio, entre otros. La inversión en este ítem se acerca a 1.300.000 de pesos aproximados incluyendo el AIU (administración, imprevistos, utilidades).

La inversión en los equipos corresponde a la compra de la centrifugadora, el horno, los equipos del cultivo, la prensa mecánica y la dotación para el laboratorio. Dentro del flujo de caja de inversión se tendrá en cuenta una reinversión del 5% anual sobre el total de las ventas. La tabla 4 muestra la discriminación de los costos.

Tabla 4. Inversión inicial

ÍTEM	Dólar	1.900
	Precio (usd)	Precio (cop)
Infraestructura		
Terreno	78.947	150.000.000
Piscinas	321.053	610.000.000
Bodega de producción	250.000	475.000.000
Otros	39.474	75.000.000
Costo Total	689.474	1.310.000.000
Infraestructura		
Equipos		
Centrífuga	48.000	91.200.000
Horno	24.000	45.600.000
Prensa mecánica	25.000	47.500.000
Cultivo	68.000	129.200.000
Laboratorio	8.000	15.200.000
Costo Total Equipos	173.000	328.700.000
Total inversión inicial	862.474	1.638.700.000

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Los ingresos

Los ingresos están determinados por la venta total de la biomasa originados un 30% de aceite y un 70% de los carbohidratos. El precio final de venta deberá ser igual al precio de mercado del aceite de palma, que tiene un valor de 1.822 pesos por kilo para el período comprendido entre el 1° y el 31 de agosto de 2013. Este precio está regulado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en el decreto 2354 de 1996, que entre algunos parámetros tiene en cuenta los precios del mercado internacional y la comercialización de otros aceites.

Para la proyección del precio a futuro para la evaluación del modelo financiero se tomará como referencia el precio internacional del aceite de palma de los últimos 10 años, proyectando la línea de tendencia que tiene como base 100 octubre de 2011 y cuya resultante es la ecuación:

Ecuación 2. Línea de tendencia precio aceite de palma últimos 10 años

$$y = 7,1193x + 979,93 \quad (2)$$

Dónde:

$y = \text{Precio}$

$x = \text{Índice del año que corresponde}$

3.4.4 Costo promedio ponderado de capital (WACC)

Esta es la tasa con la cual evaluaremos el proyecto, en particular no se prevé endeudamiento, por lo que la estructura de la deuda es un Equity = 100%; Deuda = 0. Cuando el Equity es 100% el WACC será igual a la rentabilidad del costo de oportunidad esperada por los socios que en este caso particular es igual al 10%.

3.4.5 Variables macroeconómicas

Las variables macroeconómicas propuestas para la elaboración del modelo financiero son la inflación, que se calcula con base en el IPC, y el dólar, para la proyección de las variables se toman como referencia los informes realizados por el Banco de la República y Bancolombia.

Según el informe más actualizado a la fecha del Banco de la República (marzo 2013) se proyecta una inflación para los próximos tres años entre 2,5% y 3%, la tendencia en la economía nacional es mantener una inflación controlada por debajo del 5% con tendencia a la baja como lo muestra el comportamiento de los últimos años, por lo tanto y para efectos del ejercicio se tomará como referencia el 3% constante para todos los años de evaluación.

Frente al comportamiento del dólar se tomará un precio de 1.900 pesos por dólar, la expectativa que se tiene es mantener un precio entre los 1.900 y los 2.000 pesos, según las medidas que está tomando el Banco de la República con la compra de dólares y los leves signos

de recuperación que muestra la economía de Estados Unidos, que causaría la salida de dólares hacia ese país y el aumento del precio en el nuestro.

3.4.6 Costos de operación

Los costos de operación de la planta son todos aquellos rubros que están relacionados con los insumos para el cultivo, el mantenimiento de equipos, el costo de energía necesarios para el funcionamiento.

Los insumos del cultivo son los nutrientes como nitrógeno, con un consumo de aproximadamente 6.000 kg anuales; hierro, 600 kg anuales; fósforo, 600 kg anuales. Los costos de energía para 8.000 horas por año, con un consumo anual de aproximadamente 190.000 kw/h a un precio promedio 430 pesos por kw/h, dan un precio anual de 81.700.000 pesos. El mantenimiento se calcula a un precio global de 20.000.000 de pesos anuales.

3.4.7 Costos de mano de obra

Los costos de mano de obra incluyen todos los costos legales, salario básico, primas, vacaciones, parafiscales, cesantías, intereses de las cesantías, seguridad social (EPS, Pensiones, ARP), subsidio de transporte, dotaciones. La tabla 5 muestra el costo anual por persona para los cuatro cargos mencionados anteriormente.

Tabla 5. Costos mano de obra

Personal	Salario	Total Mensual (carga prestacional)	Total Anual
Director planta	2.500.000	3.846.317	46.155.800
Tecnólogo	1.500.000	2.317.790	27.813.480
Tecnólogo	1.500.000	2.317.790	27.813.480
Operario cultivo	1.000.000	1.621.327	19.455.920
Total	6.500.000	10.103.223	121.238.680

Fuente: Elaboración propia.

3.4.8 Costos administrativos

Son los costos propios de la administración, gasto en seguros, viajes, seguridad, pago de servicios, *outsourcing* de aseo, entre otros. Estos costos se calculan en 15.000.000 de pesos anuales.

3.5 Análisis de resultados

Los resultados arrojados por el modelo financiero para las condiciones antes descritas son:

Tabla 6. Resultado financieros escenario 1

TIR PROYECTO	1,29%	RECHAZO
TMRR	10,00%	
VP	845.910.721	RECHAZO
Inversión inicial	1.798.700.000	
VPN	-952.789.279	RECHAZO
VAUE	-102.176.339	
VFN	2.194.074.553	
TIRM O VTR	2,38%	
	2,01%	
TIRM	2,44%	RECHAZO
Inversión socios	10,00%	
VANI	-52,97%	
R B/C	845.910.721	

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 6 podemos analizar que:

- La tasa de retorno del proyecto se estima en 8,71 puntos porcentuales por debajo de la tasa esperada por los socios, lo cual convierte el proyecto en económicamente ‘no viable’.
- El retorno de los flujos (VPN) descontados a la tasa de los socios da un déficit mayor del 50% sobre la inversión inicial, lo cual lo no lo hace viable para la condiciones inicialmente planteadas.

Si en particular cambiamos la productividad, en una constante para los 10 años igual a 50g/m²-día los resultados son los siguientes:

Tabla 7. Resultados financieros escenario 2

TIR PROYECTO	3,07%	RECHAZO
TMRR	10,00%	
VP	1.116.634.120	RECHAZO
Inversión inicial	1.798.700.000	
VPN	-682.065.880	RECHAZO
VAUE	-80.239.056	
VFN	2.896.261.330	
TIRMO VTR	4,88%	
TIRM	4,88%	RECHAZO
Inversión socios	10,00%	
VANI	-37,92%	
R B/C	1.116.634.120	

Fuente: Elaboración propia.

- Al aumentar productividad, necesariamente se aumenta la tasa de retorno en 1,78 puntos porcentuales pero continúa lejos de la tasa esperada por los accionistas.
- Disminuye la relación entre el VPN y la inversión inicial, pero sigue siendo negativa en un 37,92%

- La tasa verdadera de retorno del proyecto o TIRM se ubica en 4,88% .

Si analizamos un tercer escenario donde mantengamos la productividad en 50g/m²-día y aumentamos el área de 1 Ha los primeros cinco años y 1,5 Ha los siguientes cinco, a una área de 2 Ha constantes, obtenemos lo siguiente:

Tabla 8. Resultados financieros escenario 3

TIR PROYECTO	14,93%	
TMRR	10,00%	ACEPTO
VP	2.283.409.637	
Inversión inicial	1.798.700.000	ACEPTO
VPN	484.709.637	
VAUE	96.309.137	ACEPTO
VFN	5.922.576.530	
TIRMO VTR	12,66%	
TIRM	12,66%	
	12,66%	ACEPTO
Inversión socios	10,00%	
VANI	26,95%	
R B/C	2.283.409.637	

Fuente: Elaboración propia.

- La TIR del proyecto está por encima 4,93 puntos porcentuales de la expectativa de los socios lo cual lo hace un proyecto atractivo.
- La relación entre la inversión y el rendimiento es igual 26,98%, positiva.
- El VPN, es decir, los flujos traídos al presente menos la inversión inicial es positiva con un valor de 484.708.637 de pesos.

De lo anterior podríamos decir que la rentabilidad del proyecto está directamente relacionada con el área disponible para cultivo y paralelamente se debe alcanzar una productividad constante de las microalgas.

Los escenarios planteados dan una perspectiva clara de hacia dónde deben enfocarse los recursos para que el proyecto dé resultados positivos y estos son: la capacidad para obtener tierra disponible de cultivo y el trabajo de investigación en el laboratorio para aumentar productividad.

4 Conclusiones

En el desarrollo de este trabajo se buscaba analizar si es viable o no dar una apuesta por uno de muchos desarrollos que hoy se presentan en biotecnología, se expusieron diversos temas, como qué son las microalgas, cuáles son sus propiedades, se abordaron temas de ingeniería a través de cómo podría ser y qué debería tener una planta de producción de microalgas, se realizó una simulación financiera cuantificando el costo del desarrollo de la ingeniería en términos de la productividad que ofrecen las microalgas y algunos otros temas, todo esto para dar respuesta a una pregunta: ¿Es factible la implementación de una planta de producción de biomasa a partir de microalgas en Colombia? La respuesta en concepto del autor es SÍ, y estas son algunas de las razones por las cuales considero la viabilidad:

- Colombia ofrece las condiciones medioambientales óptimas para desarrollar un proyecto con microalgas, la disponibilidad de agua, de tierra, la luminosidad que ofrece especialmente el norte del país, hacen que esto sea viable.
- Desde el punto vista legal también están dadas las garantías para este tipo de proyectos, es posible que existan vacíos de ley por lo novedoso del mismo, pero se pueden ajustar en la medida en que se cumplan todas las condiciones exigidas por las autoridades ambientales, que obedecen a las normas establecidas por el país, tendientes a la preservación del medioambiente.
- El proyecto es económicamente viable en la medida en que haya disponibilidad de área para cultivo y aumento en la productividad de las microalgas, lo cual depende directamente de las investigaciones propias que se realicen en el laboratorio del proyecto y se conviertan en el valor agregado de los posibles inversores.

- El ingreso neto por hectárea con una condición en rendimiento conservadora para las microalgas de $20 \text{ g/m}^2\text{-día}$ es siete veces superior al del aceite de palma.
- La mayor rentabilidad del proyecto se encuentra en la comercialización de productos de valor agregado como biodiésel, productos cosméticos, productos farmacéuticos, que tienen un alto valor de mercado en comparación con la biomasa.
- Este tipo de iniciativas, por ser de largo plazo, necesitan del apoyo de capitales de riesgo, donde los retornos son altos pero al final del período.
- En la medida en que se presenten más desarrollos a nivel de industria, equipos e investigaciones en el sector de las microalgas, serán más y mejores los rendimientos técnicos y económicos que se presenten.
- Es necesario que nuestro país aumente y estimule a través de una política estatal los proyectos de base tecnológica si se quiere disminuir la brecha socioeconómica que nos separa de los países más desarrollados.

5 Bibliografía

Adam, E. E., & Ebert, R. J. (1991). *Administración de la producción y las operaciones*. México: Prentice-Hall Hispanoamérica.

Algae Industry Magazine. (s.f.). Recuperado el 20 de 4 de 2013, de <http://www.algaeindustrymagazine.com/special-report-spirulina-part-1-origins-and-biology/>

Andersen, R. A. (2005). *Algal Culturing Techniques*. Burlington: Elsevier Academic Press.

Anoop, S., & Stig Olsen, I. (2011). A Critical Review of Biochemical Conversion, Sustainability and Life Cycle Assessment of Algal Biofuels. *Applied Energy*, 3548-3555.

Banco de la República. (s.f.). *Banco de la República*. Obtenido de <http://www.banrep.gov.co/publicaciones-buscador/2035>

Bancolombia. (s.f.). *Bancolombia*. Obtenido de <http://investigaciones.bancolombia.com/InvEconomicas/home/homeinfo.aspx>

Becker, E. (2007). Micro-algae as a Source of Protein. *Biotechnology Advances*, 207-210.

Benemann, J. R. (1992). Microalgae Aquaculture Feeds. *Journal of Applied Phycology*, 233-245.

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from Microalgae — A Review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co-Products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 557-577.

Chisti, Y. (2007). Biodiesel from Microalgae. *Biotechnology Advances* , 294-306.

Chisti, Y., & Yan, J. (2011). Energy from Algae: Current Status and Future Trends Algal Biofuels – A Status Report. *Applied Energy* , 3277-3279.

Daroch, M., Geng, S., & Wang, G. (2013). Recent Advances in Liquid Biofuel Production from Algal Feedstocks. *Applied Energy* , 1371-1381.

Doucha, J., Livansky, K., Kotrbacek, V., & Zachleder, V. (2009). Production of Chlorella Biomass Enriched by Selenium and its Use in Animal Nutrition: A Review. *Appl Microbiol Biotechnol* , 1001-1008.

FAO. (2012). *Hacia el futuro que queremos*. Roma.

Fedebiocombustibles. (2013). *Cifras informativas del sector biocombustibles*. Bogotá.

Gitman, L. J. (2007). *Principios de administración financiera*. México: Pearson Educación.

Godoy, E., Rangel, C., Sato, S., & Monteiro de Carvalho, J. (2011). Growth and Content of *Spirulina Platensis* Biomass Chlorophyll Cultivated at Different Values of Light Intensity and Temperature Using Different Nitrogen Sources. *Brazilian Journal of Microbiology* , 362-373.

Gouveia, L., & Oliveira, A. C. (2009). Microalgae as a Raw Material for Biofuels Production. *J Ind Microbiol Biotechnol* , 269-274.

Gómez, E., & Díez, J. (2011). *Evaluación financiera de proyectos*. Medellín: Universidad Eafit.

Hemaiswarya, S., Raja, R., Kumar, R. R., Ganesan, V., & Anbazhagan, C. (2011). Microalgae: A Sustainable Feed Source for Aquaculture. *World J Microbiol Biotechnol* , 1737-1746.

Henrik Norsker, N., Barbosa, M., Vermuë, M., & Wijffels, R. (2011). Microalgal Production — A Close Look at the Economics. *Biotechnology Advances* , 24-27.

Herrera, V., Contreras, P., López, S., Peraza, S., & Barahona, L. (2011). The Green Microalga *Chlorella saccharophila* as a Suitable Source of Oil for Biodiesel Production. *Curr Microbiol* , 151-157.

Hitt, M., Ireland, R., & Hoskisson, R. (2008). *Administración estratégica*. México: Cengage Learning.

International Energy Agency (IEA). (2011). *Technology Roadmap Biofuels for Transport*. París.

Jung, I., & Lovitt, R. (2010). Integrated Production of Long Chain Polyunsaturated Fatty Acids (PUFA)-Rich Schizochytrium Biomass Using a Nutrient Supplemented Marine Aquaculture Wastewater. *Aquacultural Engineering* , 51-61.

Kotler, P., Camara, D., Grande, I., & Cruz, I. (2000). *Dirección de Marketing*. Madrid: Pearson Educación.

Morris, H., Quintana, M., Almarales, Á., & Hernández, L. (1999). Composición bioquímica y evaluación de la calidad proteica de la biomasa autotrófica de la *Chlorella vulgaris*. *Rev Cubana Aliment Nutr* , 1-6.

Nassir, S. C. (2007). *Proyectos de inversión. Formulación y evaluación*. México: Pearson Educación de México.

Nuffield Council on Bioethics. (2011). *Biofuels: Ethical Issues*. London: Nuffield Press.

Park, J., Craggs, R., & Shilton, A. (2011). Wastewater Treatment High Rate Algal Ponds for Biofuel Production. *Bioresource Technology* , 35-42.

Pires, J., Alvim-Ferraz, M., Martins, F., & Simoes, M. (2012). Carbon Dioxide Capture from Flue Gases Using Microalgae: Engineering Aspects and Biorefinery Concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 3043-3053.

Sánchez, E. (2012). Perspectivas del proceso de producción de biodiésel de tercera generación. *Universidad de San Buenaventura* , 1-17.

Spoloare, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Commercial Applications of Microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering* , 87-96.

Superintendencia de Industria y Comercio. (2011). *Cadena productiva de alimentos concentrados y balanceados para la industria avícola y porcina*. Bogotá.

Tan, C. K., & Johns, M. R. (1996). Screening of Diatoms for Heterotrophic Eicosapentaenoic Acid Production. *Journal of Applied Phycology* , 59-64.

Toro, I. D., & Parra, R. D. (2010). *Fundamentos epistemológicos de la investigación y la metodología de investigación cualitativa y cuantitativa*. Bogotá: Universidad Eafit.

U.S. Energy Information Administration (EIA). (2011). *The Annual Energy Outlook 2011*. Washington, DC.

Wenguang, Z., Bing, H., Yecong, L., Min, M., Michael, M., Zhenyi, D., y otros. (2012). Mass Cultivation of Microalgae on Animal Wastewater: a Sequential Two-Stage Cultivation Process for Energy Crop and Omega-3-Rich Animal Feed Production. *Appl Biochem Biotechnol* , 348-363.

Wiley, P. E., Campbell, J. E., & McKuin, B. (2011). Production of Biodiesel and Biogas from Algae: A Review of Process Train Options. *Water Environment Research* , 326-338.

Yihe, G., Chapin, G., Yuanjie, L., Dawei, T., & Caitlin, T. (2012). Algae Biodiesel - A Feasibility Report. *Chemistry Central Journal* , 1-16.