

Nota técnica

## Posibles factores que afectan el costo y la rentabilidad de la producción de microalgas: una revisión bibliográfica

Factors affecting the cost and profitability of microalgae production: a literature review



Olga María Calvo Hernández<sup>1</sup>

Anyoleth Mora Ureña<sup>2</sup>

Wilson Muñoz Valerio<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Docente e investigadora.  
Correo: [olga.calvohernandez@ucr.ac.cr](mailto:olga.calvohernandez@ucr.ac.cr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6225-3017>

<sup>2</sup> Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Estudiante.  
Correo: [anyoleth.mora@ucr.ac.cr](mailto:anyoleth.mora@ucr.ac.cr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3453-1646>

<sup>3</sup> Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Estudiante.  
Correo: [wilson.munoz@ucr.ac.cr](mailto:wilson.munoz@ucr.ac.cr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8627-3883>



*Fecha de recepción: 30 de mayo, 2022*

*Fecha de aprobación: 29 de noviembre, 2023*

**Vol. 10 . Enero- diciembre 2024 (Publicación continua)**

Calvo Hernández, O., Mora Ureña, A. y Muñoz Valerio, W. (2024). Posibles factores que afectan el costo y la rentabilidad de la producción de microalgas: una revisión bibliográfica. *E-Agronegocios*, 10(1). <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/eagronegocios/article/view/6657>

 DOI: <https://doi.org/10.18845/ea.v9i1.6657>

## Resumen

La producción científica y académica relacionada con la producción de microalgas, tiene un enfoque sustantivo que expone la rentabilidad desde el punto de vista de la eficiencia de diferentes sistemas de producción, así como de la interacción de diversos factores. No obstante, la investigación académica y científica generada en esta área, se restringe en la revisión de los factores que podrían influir en el costo y rentabilidad asociada a la producción de microalgas; con ello, surge la necesidad de conocer cuáles son aquellos factores que podrían presentar una posible afectación en este tema. A partir de una revisión documental se evidenció que no se presenta una inclinación o influencia evidente hacia uno o más factores en específico, ya que la rentabilidad y el costo dependerán de la interacción de diversos aspectos, como fuentes de carbono, sistema productivo, medio de producción, estrategias de recolección, productividad biológica, ubicación geográfica, valor y cantidad requerida de mano de obra, tarifas y uso de agua, entre otros.

**Palabras clave:** costos-eficiencia, finanzas, factores de producción, materia prima, compilación bibliográfica.

## Abstract

The scientific and academic production related to microalgae production has a substantive approach that exposes the profitability from the point of view of the efficiency of different production systems, as well as the interaction of various factors. However, the academic and scientific research generated in this area is restricted to the review of the factors that could influence the cost and profitability associated with microalgae production; thus, the need arises to know which are those factors that could have a possible impact on this topic. From a documentary review, it became evident that there is no evident inclination or influence towards one or more specific factors, since profitability and cost will depend on the interaction of various aspects, such as carbon sources, production system, means of production, harvesting strategies, biological productivity, geographic location, value and required amount of labor, tariffs, and water use, among others.

**Key words:** cost-efficiency, finance, production factors, raw materials, bibliographic compilation.

## Introducción

A través de una revisión documental, se busca identificar aquellos factores que muestran mayor incidencia sobre el costo y la rentabilidad en la producción de microalgas. La exploración en avances tecnológicos para optimizar la rentabilidad económica de esta actividad es un tema que ha tomado alta relevancia a través de los años. Dada su importancia como fuente de materia prima en la generación de productos alimenticios (Draaisma et al., 2013), farmacéuticos, cosméticos, así como biocombustibles y medios de biorremediación (Bhatt et al., 2022), (Napolitano et al., 2022; Ramírez y Olvera, 2006), (Lam y Lee., 2012); la producción de microalgas se visualiza como una buena oportunidad de mercado (Villalta et al., 2019), que podría considerarse como rentable.

La literatura asociada a este tema expone que, en determinados casos, la rentabilidad y el costo de producción se verán afectados por el tipo de sistema productivo a utilizar. En situaciones concretas, el uso de sistemas cerrados<sup>1</sup> mejora la eficiencia de la producción, debido al control estricto que se puede tener sobre los factores y variables involucradas en la producción (Zhu et al., 2022; Barceló et al., 2022; Acién et al., 2017b; Tredici, 2004; Tredici, 2010, Tredici et al., 2016; Slade y Bauen, 2013). Contrario a esta aseveración, otras personas autoras, se inclinan hacia el uso sistemas abiertos<sup>2</sup> dado que, se consideran más eficientes, ya que permiten trabajar bajo un menor costo (Acién et al., 2017b; Tredici, 2004; Tredici, 2010; Tredici et al., 2016).

Según la evidencia documental, la eficiencia de cada sistema se manifestará en la rentabilidad y el costo de producción. De cierta manera, esta eficiencia obedecerá al uso de fuentes de carbono (Morais et al., 2009; Norsker et al., 2011; Slade y Bauen, 2013), medios de producción (Vonshak y Richmond, 1988; Madkour et al., 2012; Raoof et al., 2006; Norsker et al., 2011; Slade y Bauen, 2013), costo del agua (Slade y Bauen, 2013), valor y cantidad requerida de mano de obra (Acién et al., 2012; Vonshak y Richmond, 1988; Madkour et al., 2012), estrategia de recolección y sistema productivo (Acién et al., 2017b); así como la productividad biológica, ubicación geográfica y tecnología utilizada en el cultivo (Chauton et al., 2015).

Generalmente, los estudios científicos relacionados con esta actividad se han realizado y evaluado a pequeña escala o nivel de laboratorio, lo que se convierte en un punto importante que limita el análisis y el reflejo de una rentabilidad real (Dębowski et al.,

---

<sup>1</sup> Se hace uso de fotobiorreactores o PBR (por sus siglas en inglés), los cuales permiten tener un mayor control debido a que, se presenta poco o nulo contacto con el ambiente externo (Contreras et al., 2003; Tredici, 2004 y Posten, 2009, como se citó en Hernández y Labbé, 2014).

<sup>2</sup> En el sistema de producción abierto, la biomasa se encuentra expuesta al ambiente (Borowitzka, 1999; Contreras et al., 2003 y Tredici, 2004, como se citó en Hernández y Labbé, 2014).

2020). Según Dębowski et al. (2020), este aspecto es considerable ya que limitará la obtención de datos confiables y, por ende, no permitirá el desarrollo de un análisis exhaustivo que permita la toma de decisiones acertadas, en sus diferentes escenarios de producción, como agrícola, alimentario, farmacéutico, de biocombustibles, entre otros.

La viabilidad de estos sistemas productivos, comúnmente, se analiza a través de la realización de estudios técnicos-económicos (financieros), de los cuales se obtiene una rentabilidad (Chauton, 2015; Lundquist, 2010; Davis et al., 2011; Norsker et al., 2011; Richardson et al., 2012; Slade y Bauen, 2013; Benvenuti, 2016, citado por Tredici et al., 2016). Pese a esto, se reconoce la falta de información económica asociada específicamente a la producción de microalgas (García et al., 2018; Shimamatsu, 2004, y Benemann, 2013), lo que no permite conocer información pertinente de los diferentes ámbitos de la actividad (mercado, técnico, legal, organizacional, ambiental y financiero).

## Apreciaciones teóricas

Las microalgas son microorganismos que se caracterizan por poseer clorofila y otros pigmentos, que les otorgan la capacidad de poder llevar a cabo el proceso de fotosíntesis oxigénica (Gómez, 2007). Particularmente, dentro de este grupo se incluyen las cianobacterias o algas verde-azules (Abalde, 1995), como es el caso de la spirulina sp (tipo de microalga), una de las más conocidas. Esta es un organismo fotosintético procarionta, con un origen de hace más de tres mil millones de años. Se caracteriza por ser una la cianobacteria filamentosa color verde azulada, con la capacidad de disminuir la cantidad de dióxido de carbono y a su vez, incrementar el oxígeno disponible en la tierra, su forma de reproducción es por fisión binaria o también conocida como bipartición (Malpartida et al., 2022).

La producción de microalgas se puede llevar a cabo bajo dos tipos de sistemas de producción, abierto y cerrado. En el sistema de producción abierto, la biomasa se encuentra expuesta al ambiente (Borowitzka, 1999; Contreras et al., 2003 y Tredici, 2004, como se citó en Hernández y Labbé, 2014). En el cerrado, se hace uso de fotobiorreactores o PBR (por sus siglas en inglés), los cuales permiten tener un mayor control debido a que, se presenta poco o nulo contacto con el ambiente externo (Contreras et al., 2003; Tredici, 2004 y Posten, 2009, como se citó en Hernández y Labbé, 2014). Independientemente del sistema a utilizar y los criterios de decisión tomados en cuenta para su uso, la rentabilidad es un punto indispensable por considerar en el desarrollo de cualquier actividad o sistema de producción. En ese caso, esta se convierte en una de las motivaciones más relevantes y atractivas, para que diferentes personas inviertan su dinero en una actividad (Morillo, 2001).

La evaluación de una actividad o un proyecto no debe ser vista sólo desde la rentabilidad financiera o económica, en tal caso, deben considerar otros elementos que per-

mitan conocer la viabilidad de la actividad en términos de mercado, técnicos, legales, organizacionales y ambientales. En cuyo caso se presente algún resultado negativo o falencia en la viabilidad de alguno de los apartados anteriores, a pesar de que el proyecto sea rentable, este no debería de desarrollarse (Sapag et al., 2014).

Según (Morillo, 2001), la rentabilidad es

Una medida relativa de las utilidades es la comparación de las utilidades netas obtenidas en la empresa con las ventas (rentabilidad o margen de utilidad neta sobre ventas), con la inversión realizada (rentabilidad económica o del negocio), y con los fondos aportados por sus propietarios (rentabilidad financiera o del propietario) (p.36).

## Tipo de abordaje

Se trabajó bajo una investigación documental, que se sustentó en un diseño bibliográfico y hemerográfico. Orientada en la revisión bibliográfica o documental que, como indica Martínez de Sousa (1993) (citado en Martin y Lafuente, 2015) es un proceso de búsqueda sistemática y exhaustiva de materiales en diferentes fuentes de información, que se enfocan en encontrar resultados sobre una temática en específico.

Con este abordaje en una primera instancia, se buscó identificar aquellos factores que se mencionan de forma directa o indirectamente, como agentes que podrían modificar el costo y la rentabilidad de la producción de microalgas. La exploración se orientó en artículos científicos, libros, tesis de grado y posgrado; disponibles específicamente en Scopus, ScienceDirect, Elsevier, Scielo y Google Scholar. Tomando para ello referencias del año 2000 al 2022; sin embargo, se incluyeron referencias importantes correspondientes a los años noventa, considerando que podrían aportar de forma significativa a criterios a analizar dentro de esta revisión bibliográfica.

Con esto se buscará identificar aquellos posibles factores, que de cierta manera se presumen de manera reiterativa en las investigaciones como posibles aspectos que podrían impactar el costo o rentabilidad de la producción de microalgas. Se hace necesario indicar que, no se profundiza en la generación de frecuencias relativas o absolutas, dado que, la mayoría de la investigaciones revisadas hace referencia a una aseveración o posibilidad, que no necesariamente se ve respalda por una evaluación numérica que realmente permita validar esa afirmación.

## Resultados y discusión

El costo de producción guarda una relación directa con el rendimiento obtenido, que difiere según diferentes factores. Sin embargo, esta actividad se caracteriza por presentar poca información relacionada a esta temática, dado que, las empresas o pro-

yectos de carácter privado generalmente se reservan este tipo de datos para uso interno (Shimamatsu, 2004). En ese mismo sentido García et al. (2018), resaltan la carencia de estudios que permitan conocer o evaluar el costo de producción de microalgas, más si se enfoca este tipo de análisis a futuro. Una restricción relevante en el análisis de costos para la producción de microalgas, es la dependencia de datos y parámetros extrapolados que fueron escalados a nivel de laboratorio (Slade y Bauen, 2013).

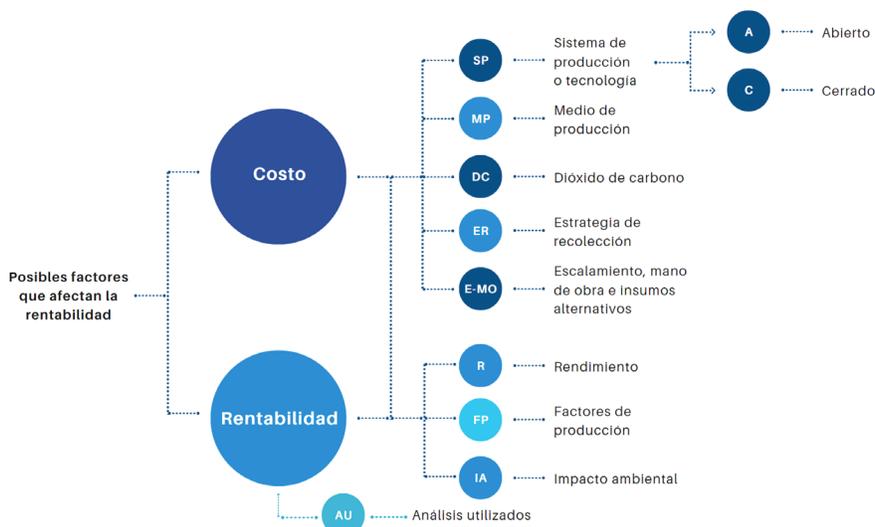
García et al. (2018), Shimamatsu (2004) y Benemann (2013) respaldan el punto de la carencia de información económica referente a la producción de microalgas, ya que se dispone de datos y costos de producción realizados a partir de estimaciones. Benemann (2013) estimó que la producción de una tonelada de biomasa de peso seco de microalga (cepa spirulina sp), puede alcanzar los 10 mil dólares sin incluir costos operativos y de comercialización. Otra investigación realizada en Perú evaluó la utilización de microalgas (cepa spirulina sp) como insumo complementario en la producción de lechugas, con lo que se pudo estimar que el costo de 250 gramos era equivalente a 250 soles (35,77 dólares) (Chávez y Melgar, 2016).

Es por ello, que esta investigación más que estimar o realizar una comparación del costo de producción, busca definir cuáles factores se mencionan de forma reiterada en la literatura académica, como aquellos posibles aspectos que podrían afectar el costo y rentabilidad de la producción de microalgas.

### ***1. Posibles factores que podrían afectar el costo de producción***

Como parte de la revisión realizada, fue posible reconocer al menos cinco elementos mencionados en las diferentes investigaciones, como posibles factores que podrían afectar el costo (Figura 1). En ese caso, se resalta la influencia que tiene el sistema de producción, medio de cultivo, dióxido de carbono, entre otros, como factores que podrían de cierta forma alterar el costo de producción.

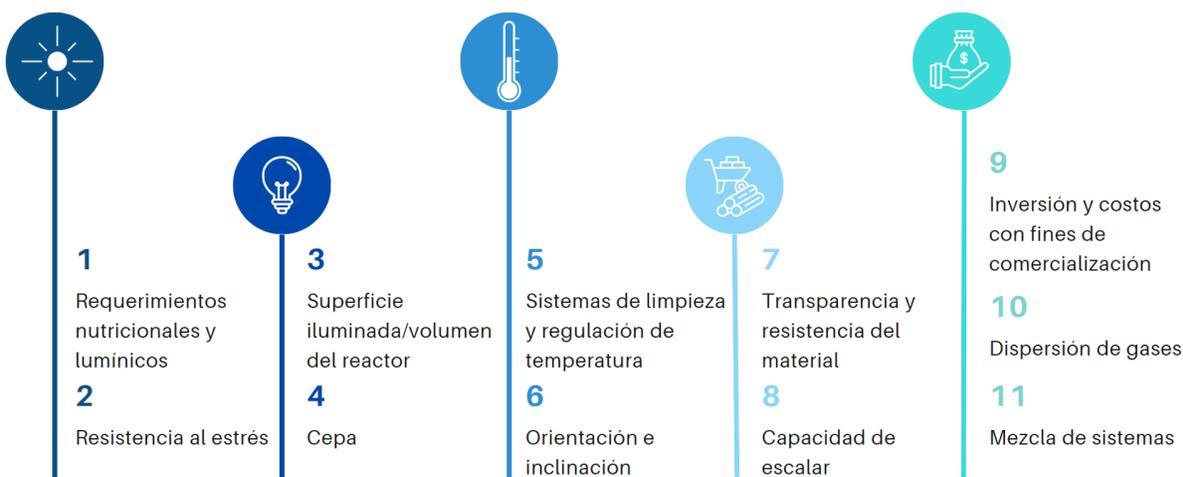
A nivel de rentabilidad, se reconoció que de cierta manera todos los posibles factores que modifican el costo variarán por ende la rentabilidad. No obstante, se resalta a su vez la relevancia que tiene el rendimiento o productividad de la actividad, la calidad de los factores de producción y el posible impacto ambiental que genera la actividad.



**Figura 1.** Factores que considerar para definir el tipo de sistema a utilizar para producir microalgas.

### 1.1 Sistemas de producción o tecnología

Diversa literatura destaca el papel que juegan los sistemas de producción en la regulación del costo de producción de microalgas (Acién et al., 2017a, citado en Bhatt et al., 2022). Para definir el tipo y diseño a utilizar, se deben analizar diversos factores, descritos en la Figura 2 (Borowitzka, 1999; Martínez, 2009; Contreras et al., 2003; Tredici, 2004; Posten, 2009, como se citó en Hernández y Labbé, 2014).



**Figura 2.** Factores que considerar para definir el tipo de sistema a utilizar para producir microalgas.

## Abiertos

Se considera que los sistemas de estanques abiertos son los más utilizados para la producción de microalgas desde el punto de vista comercial, donde el uso de una mezcla mejorada puede acrecentar de forma importante la productividad. Sin embargo, esta mezcla puede sufrir desperdicios dado la presencia de perturbaciones dinámicas, lo que afecta de forma directa los posibles mecanismos que dan lugar a la reducción del costo de producción (Zhu et al., 2022).

Uno de los sistemas abiertos más común en la producción de microalgas, es el raceway (tanques de poca profundidad, con agitación proporcionada por rueda de paletas). Su uso puede representar una menor inversión en comparación con los cerrados, ya que estos últimos requieren de altos costos de instalación y energéticos (Acién et al., 2017b; Tredici, 2004; Tredici, 2010, como se citó en Tredici et al., 2016).

En ciertos casos, los sistemas abiertos se consideran menos eficientes en lo que respecta a la fijación de dióxido de carbono, lo que incrementa el valor del costo de este insumo dentro del proceso productivo. Pese a ello, los sistemas de producción raceway simbolizan un menor costo de producción, que los sistemas cerrados, entendiéndose estos últimos como fotobiorreactores (Slade y Bauen, 2013).

Deza y Mendiola (2019) trabajaron la evaluación del costo de producción de microalgas (cepa *spirulina* sp), en una extensión de 500 metros cuadrados, bajo la utilización de un sistema raceway en Kenia. A partir de ello, establecieron una productividad promedio de 10 gramos por día por metro cuadrado, a un costo de 21 euros por kilogramo producido. Por su parte, Argento et al. (2016), en Pilar Córdoba, establecieron una productividad de 0,5 gramos por litro de producto seco, y a su vez, concluyeron que, el costo de producción de un frasco de *spirulina* sp de 100 cc, era de 7,39 dólares y el cual podría reducirse a 3,58 dólares en el término de 10 años. Ponce (2013) estimó que el costo de un kilogramo de *spirulina* sp, fue de siete dólares específicamente en Arica, Chile y bajo un sistema de tanques abiertos dentro de invernaderos.

Benemann (2013) expresa que, los sistemas abiertos de poca profundidad que hacen uso de paletas para la agitación son los más convenientes para la producción de microalgas. Ya que se puede hacer uso de materias primas que pueden representar un menor costo. Pese a que, este tipo de sistemas es el más extendido en lo que respecta a la producción de microalgas, se indica que estos poseen ciertos inconvenientes, debido principalmente a la baja capacidad de transferencia de masa, lo que deriva en una acumulación del oxígeno disuelto y, por ende, afectan el rendimiento (Barceló et al., 2022). Sumado a ello, este tipo de tanques presentan otras desventajas, como el uso de altos volúmenes de agua por unidad de superficie y la alteración generada por contaminantes atmosféricos y organismos competidores (Acién et al., 2017b; Tredici, 2004; Tredici, 2010, como se citó en Tredici et al., 2016).

## Cerrados

Por el contrario, el uso de sistemas cerrados, entendiéndose estos como fotobiorreactores, permiten la reducción de pérdidas de agua dulce. Más aún, con estos se logra trabajar con una mayor concentración celular, lo que permite reducir los costos de preparación y manipulación del medio, mejorar la cosecha del producto, así como minimizar o reducir la contaminación externa. Por lo que el valor de la biomasa extraída puede adquirir un mayor precio en el mercado de alimentos y cosméticos (Acién et al., 2017b; Tredici, 2004, como se citó en Tredici et al., 2016).

Personas autoras como Norsker et al. (2011), estimaron el costo de producción de microalgas bajo diferentes sistemas de producción, estanques abiertos, fotobiorreactores tubulares horizontales y fotobiorreactores planos. A partir del análisis anterior, concluyeron que los fotobiorreactores tubulares horizontales reflejaban el costo de producción más bajo, seguido por los estanques abiertos y dejando a los fotobiorreactores planos, como aquellos más costosos.

En España, bajo un escenario de producción de 100 hectáreas y con la utilización de fotobiorreactores, el costo de producción de microalgas fue de 6,4 euros por kilogramo. Las personas autoras resaltan que, el nivel óptimo económico de producción son 100 hectáreas, niveles inferiores a este o producciones a pequeña escala no resultan rentables; ya que no existe la capacidad de poder diluir los costos fijos, lo que se traduce en un aumento en el costo de producción (Ruiz et al., 2016 como se citó en García et al., 2018).

En Almería, España, bajo un escenario de escala semiindustrial, haciendo uso de fotobiorreactores tubulares aireados, el costo de producción de un kilogramo de microalga fue de 69 euros (62,95 dólares estadounidenses) (Acién et al., 2012). En caso de que el rendimiento pueda llegar a las 200 toneladas por año, el costo podría reducir a 12 euros por kilogramo producido (Acién et al., 2012).

No se destaca un predominio específico hacia el uso de un determinado tipo de sistema de producción. Como se puede demostrar, las personas autoras explican de forma general fortalezas y debilidades a partir de la evaluación realizada y el objetivo que se buscaba. Lo que es importante de destacar, es que este tipo de sistemas se encuentran en un proceso constante de actualización, ya que lo que se busca es maximizar la capacidad productiva al menor costo de producción posible; lo cual dependerá de diferentes elementos, materiales, clima, cepa a utilizar, productividad, entre otros aspectos (Acién et al., 2017b).

Como resume Acién et al., (2017a) la producción de microalgas, sus necesidades y diseño, deben estar en función del uso final de la biomasa y la calidad que se quiere obtener de esta. En ese sentido, este aspecto ha dado lugar a la introducción de nuevo equipo y maquinaria que permitan cubrir los objetivos primarios de la producción.

## 1.2 Medio de producción (nutrientes)

Como parte del proceso productivo y la valoración de este, diversas personas autoras resaltan el papel de los nutrientes, como aquellos insumos que representan un mayor peso sobre el costo de producción de microalgas. Morais et al. (2009), indican específicamente, que el carbono es el elemento más costoso y que este podría abarataarse a través del uso de carbonato de sodio o bicarbonato. El valor de los nutrientes ha sido considerado como el segundo elemento de importancia en la escala de costos de producción (para microalgas como la spirulina sp), situándose este sólo por debajo de la mano de obra. Esta situación de los nutrientes o medio de producción ha impulsado la formulación de investigaciones, determinadas a buscar medios de cultivo que permitan desarrollar la producción a un menor costo (Vonshak y Richmond, 1988, como se citó en Madkour et al., 2012).

En vista de ello, Raoof et al. (2006) desarrollaron un nuevo medio (RM6) con el objetivo de producir microalgas (cepa spirulina sp), tomando como referencia, algunos nutrientes del medio Zarrouk sustituyéndolos por otros productos químicos que podrían mejorar la economía de la producción. Madkour et al. (2012) por su parte, sustituyeron con diferentes fertilizantes y productos químicos (con mayor accesibilidad económica y local), los elementos del medio Zarrouk con el objetivo de reducir el costo de producción.

## 1.3 Dióxido de carbono

El costo del dióxido de carbono y el medio, así como las condiciones de irradiación, la mezcla y la eficiencia fotosintética, son factores que tienen influencia directa sobre el costo de producción de microalgas (Norsker et al. 2011). En el caso de estanques abiertos, donde la fijación de carbono se realiza de manera menos eficiente, el valor monetario de este tiene un peso importante sobre el costo total de producción.

La adquisición de dióxido de carbono, nutrientes y agua a costos más bajos, son elementos fundamentales que pueden reducir el valor general de producción de las microalgas (Slade y Bauen, 2013). La utilización del dióxido de carbono, así como el abastecimiento de nutrientes, podrían ser aspectos que llegarían a restringir la producción de microalgas, ya que estos factores influyen de forma directa en las opciones de diseño y del sistema a utilizar (Slade y Bauen, 2013).

## 1.4 Estrategia de recolección

Acién et al. (2017b), hacen referencia a que tanto la estrategia de recolección, así como el tipo de tecnología de fotobiorreactor utilizada, tienen una alta influencia sobre su costo. Y que, la electricidad toma relevancia en el costo de producción, cuando se hace uso de fotobiorreactores cerrados y no aquellos reactores en canal (Acién et al., 2017a). Chauton et al. (2015), demostraron que la productividad biológica, ubicación geográfica y tecnología, son componentes significativos que podrían reducir este

valor monetario. En ese sentido, la tasa de crecimiento de la microalga, vigilancia de la contaminación, reducción del tiempo de renovación del cultivo y el aumento en la eficacia de la cosecha; son factores de éxito que permitirán estrechar el costo de producción (Shimamatsu, 2004).

Otros autores sugieren que la producción de microalgas ya sea con el objetivo de producir biocombustibles, alimentos para consumo humano y animal, así como para la restauración de la calidad del agua, no son económicamente sostenibles debido a alto costo de recolección (Singh y Patidar, 2018).

### **1.5 Escalamiento, mano de obra, insumos alternativos**

Como parte de otras investigaciones realizadas, personas autoras como Acién et al. (2012) exponen que la mano de obra, así como la depreciación, juegan un papel relevante como los principales elementos generadores de costo. Estos apuntan a que una simplificación de la tecnología y el escalamiento de la producción a niveles de 200 toneladas anuales, permitirán reducir de forma significativa el costo (Acién et al., 2012). De igual manera, se hace énfasis en la necesidad de reducir el costo de producción de microalgas, ya sea a través de la simplificación del diseño y materiales del sistema de producción, el uso de aguas residuales y gases de combustión; o partir de la disminución del consumo de energía (Acién et al., 2012).

A diferencia de otro tipo de actividades, que se caracterizan por la presencia de un factor de costeo que sobresale o marca pauta sobre los demás, en la producción de microalgas no se evidencia o determina un elemento en específico. Caso contrario, el valor del costo de producción puede verse afectado por muchos factores, siendo el dióxido de carbono y el medio utilizado, los más indicados por las personas autoras como mecanismos de influencia directa sobre el costo de producción.

## **2. Factores incidentes en la rentabilidad de la producción de microalgas**

### **2.1 Rendimiento y factores de producción**

Cuando se hace referencia a la rentabilidad, se puede hablar del tema en función del rendimiento de producción, ya que la cantidad producida afectará de forma directa los ingresos, la utilidad y por ende la rentabilidad. La luz, temperatura y nutrientes son determinantes claves en la cantidad y la composición de la biomasa, lo que afecta de forma directa el rendimiento y también la posible rentabilidad del proyecto (Morais et al., 2009).

La radiación solar y variación entre estaciones o épocas climáticas, interviene de forma directa sobre el rendimiento y supervivencia de las microalgas (Slade y Bauen,

2013). Por su parte, Zhu et al. (2022) concuerdan en que, cambios producidos a nivel de temperatura del cultivo y la luz solar, pueden generar malos resultados, así como también el desperdicio de recursos. Igualmente, opciones como el uso de aguas residuales y gases de combustión como fuentes de nutrientes, podrían implicar reducciones en el costo de producción de las microalgas (Acién et al., 2017) y mejorar con ello, la rentabilidad. Con el objetivo de optimizar este indicador, se ha apostado principalmente por dos factores, el primero de ellos y al cual se le ha brindado mayor prioridad, corresponde en acrecentar la productividad de los sistemas de cultivo. Por otra parte, y en un segundo plano, se ha trabajado en disminuir los costos de producción, tanto de capital como operativos (Chauton et al., 2015).

## **2.2 Impacto ambiental y su afectación a la rentabilidad**

La disponibilidad y extensión de tierras con condiciones topográficas y edafológicas adecuadas se consideran limitantes que podrían afectar el desarrollo de la actividad (Slade y Bauen, 2013). Las ventajas competitivas de una región o país para la producción de microalgas a bajo costo, el control de la temperatura, la mitigación de la contaminación externa a través del uso de invernaderos de plástico y la simplificación de la construcción de los modelos de tanques e invernaderos, son factores de éxito clave para la producción (Lu et al., 2011).

Desde el punto de vista ambiental, una posible contaminación por el uso de nutrientes o eutrofización, podría ser un componente que generará un impacto negativo sobre el ambiente; afectando de forma directa su viabilidad. No obstante, este aspecto se puede mitigar a través del uso de sistemas de tratamiento de aguas, que de cierta forma incrementarán la inversión inicial y posiblemente le exija más a su rentabilidad (Slade y Bauen, 2013).

## **3. Análisis utilizados para evaluar costos y rentabilidad**

Diversos estudios pueden ser fuente evidente para realizar un análisis de rentabilidad, el tipo de este dependerá exclusivamente del objetivo de la evaluación y las condiciones actuales del proyecto. Para evaluar esta rentabilidad se han desarrollado y publicado diversos análisis técnico-económicos enfocados en la producción de biomasa derivada de microalgas (Tredici et al., 2016).

Chauton et al. (2015) exteriorizan que se han realizado diversos estudios económicos enfocados en la producción de microalgas, sin embargo, la mayoría de estos tiene una orientación hacia la realización de biocombustibles (Amer et al., 2011; Davis et al., 2011; Lam y Lee, 2012; Norsker et al., 2011; Rios et al., 2013; Taylor et al., 2013, como se citó en Chauton et al., 2015).

Una gran cantidad de estos análisis se han desarrollado bajo sistemas abiertos, o una

mezcla de estos con fotobiorreactores (se utilizan estos últimos para la producción del inóculo), ya que son pocos los estudios técnico-económicos que se concentran en la evaluación de sistemas cerrados exclusivamente (Chauton, 2015; Lundquist, 2010; Davis et al., 2011; Norsker et al., 2011; Richardson et al., 2012; Slade y Bauen, 2013; Benvenuti, 2016, citado por Tredici et al., 2016).

Por otra parte, el análisis técnico-económico es reconocido por ser utilizado para realizar la evaluación de proyectos de microalgas con fines comerciales. Considerando como parte de las evaluaciones, estanques de canales abiertos, fotobiorreactores y depuradores de césped de alga (Bhatt et al., 2022).

Richardson et al. (2012), desarrollaron un modelo Monte Carlo, para evaluar la rentabilidad financiera de la implementación de instalaciones dedicadas a la producción de biocombustible a base de algas, en Estados Unidos. Para este modelo, las personas autoras compararon la producción bajo un sistema de fotobiorreactores contra estanques abiertos, en ese caso, pudieron identificar que la rentabilidad financiera de los fotobiorreactores es menor a lo de los sistemas abiertos.

Independientemente del tipo de análisis que se utiliza para evaluar la rentabilidad, estas valoraciones no son confrontables, dado que, la información de rendimientos y costos representan diferentes sistemas de cultivo, distintas cepas y diversas condiciones ambientales y sociales (Tredici et al., 2016). Es decir, no comparten características similares que las permitan ser confrontables. Sumado a ello, la viabilidad del proyecto dependerá meramente de aspectos técnicos y financieros, excluyendo en la mayoría de los casos criterios de mercado, legales, organizacionales y ambientales.

## Conclusiones

El sistema de producción, medio de cultivo, dióxido de carbono, escalamiento y mano de obra, son aquellos elementos considerados por las investigaciones como principales factores que pueden afectar el costo de producción. No obstante, las investigaciones revisadas se limitan en la estimación de datos numéricos, económicos o financieros, que permitan fundamentar el criterio tomado sobre aquellos factores de producción que podrían afectar de forma directa o indirecta el de costo de producción o rentabilidad. Restringiendo con ello, el análisis y categorización de la información según el grado de afectación de cada uno de los factores, y su importancia sobre el tema analizado.

La mayoría de los estudios determinan una rentabilidad y costos de producción bajo un escenario de laboratorio, que se desarrolla en ambientes controlados, mientras que otras investigaciones basan sus análisis en supuestos. Este punto afectará de forma importante la rentabilidad y costo real de una actividad, por lo que los datos generados limitarán la toma de decisiones en ese sentido. Resaltando de forma importante la falta de datos e información, relacionados a la temática de este estudio.

Muchas investigaciones abordan la rentabilidad de la actividad, pero no considerando la producción de microalgas como escenario principal, sino que se evalúa su costo en función de la necesidad de este elemento como materia prima o insumo de otra actividad principal, para la generación de biocombustibles o insumo requerido para otros tipos de alimentos.

La cantidad de luz, temperatura, accesibilidad a nutrientes de bajo costo, rendimientos de cosecha, acceso a tierras, radiación solar, condiciones topográficas y edafológicas, así como posibles contaminaciones al agua; son posibles factores que podría afectar la rentabilidad y viabilidad de la actividad.

Diversos estudios hacen referencia a posibles aspectos que podrían inferir sobre el costo de producción de microalgas, así como en la eficiencia, no obstante, estas afirmaciones no se ven respaldadas con datos concretos y numéricos que permitan evaluar la pertinencia e influencia de cada variable sobre el costo total como tal.

En determinadas investigaciones se resalta lo rentable de la actividad, aún cuando, no se respalda debidamente este criterio con los indicadores e información económica financiera que permitan darle peso a esta afirmación. Sumado a ello, y como destacan diversas personas autoras, las evaluaciones de rentabilidad, sustentados en análisis técnico-económicos, se ejecutaron bajo diversos supuestos o escenarios controlados a nivel de laboratorio, lo que limita la presentación y un estudio real de la producción.

## Literatura citada

Abalde, J., Cid, Á., Fidalgo Paredes, P., Torres, E., y Herrero, C. (1995). Microalgas: cultivo y aplicaciones. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/25013>

Acién, F., Fernández, J., Magán, J., y Molina, E. (2012). Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology advances*, 30(6), 1344-1353. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.005>

Acién, F., Molina, E., Fernández, J., Barbosa, M., Gouveia, L., Sepúlveda, C., y Arbib, Z. (2017a). Economics of microalgae production. En C, González y R, Muñoz (Eds). In *Microalgae-based biofuels and bioproducts* (pp. 485-503). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00020-0>

Acién, F., Molina, E., Reis, A., Torzillo, G., Zittelli, G., Sepúlveda, C., y Masojídek, J. (2017b). Photobioreactors for the production of microalgae. In *Microalgae-*

based biofuels and bioproducts (pp. 1-44). Woodhead Publishing.

- Amer, L., Adhikari, B., y Pellegrino, J. (2011). Technoeconomic analysis of five microalgae-to-biofuels processes of varying complexity. *Bioresource technology*, 102(20), 9350-9359. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.010>
- Argento, F., Sempere, C., y Van Lierde, F. (2016). Factibilidad técnica y económica de la producción de spirulina. [Instituto Tecnológico de Buenos Aires]. <https://ri.itba.edu.ar/entities/proyecto%20final%20de%20grado/ad872968-0587-42c0-93cf-21840d891eaf>
- Barceló, M., Hoyo, Á., Rodríguez, E., Guzmán, J., y Acién, F. G. (2022). A new control strategy to improve the mass transfer capacity and reduce air injection costs in raceway reactors. *New Biotechnology*, 70, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2022.04.005>
- Benemann, J. (2013). Microalgae for biofuels and animal feeds. *Energies*, 6(11), 5869-5886. <https://doi.org/10.3390/en6115869>
- Benvenuti, G. (2016). Batch and repeated-batch oil production by microalgae. (Tesis de Doctorado, Wageningen University and Research). <https://www.proquest.com/docview/2572247622?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>
- Bhatt, A., Khanchandani, M., Rana, M., y Prajapati, S. (2022). Techno-economic analysis of microalgae cultivation for commercial sustainability: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133456>
- Borowitzka, M. A. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of biotechnology*, 70(1-3), 313-321. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00083-8)
- Bortolini, D., Maciel, G., Fernandes, I., Pedro, A., Rubio, F., Branco, I., y Haminiuk, C. (2022). Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp.: Current status and future trends. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 5, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100134>
- Chauton, M., Reitan, K., Norsker, N., Tveteras, R., y Kleivdal, H. (2015). A techno-economic analysis of industrial production of marine microalgae as a source of EPA and DHA-rich raw material for aquafeed: Research challenges and possibilities. *Aquaculture*, 436, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.08.010>

aquaculture.2014.10.038

- Chávez, C, y Melgar, M. (2016). Comparación del efecto sobre la biomasa y tiempo de producción de lechuga hidropónica (*lactuca sativa* sp) de una solución estándar frente a un preparado de microalgas (*spirulina* sp). [Tesis de bachillerato, Universidad Católica de Santa María].
- Contreras, C., Peña, J., Flores, L., y Cañizares, R. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*, 28(8), 450-456. [http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442003000800004&script=sci\\_arttext](http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442003000800004&script=sci_arttext)
- Davis, R., Aden, A., y Pienkos, P. (2011). Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. *Applied Energy*, 88(10), 3524-3531. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.018>
- Dębowski, M., Zieliński, M., Kazimierowicz, J., Kujawska, N., y Talbierz, S. (2020). Microalgae cultivation technologies as an opportunity for bioenergetic system development—advantages and limitations. *Sustainability*, 12 (23), 1-37. <https://doi.org/10.3390/su12239980>
- Deza, E., y Mendiola, L. (2019). Plan de negocio para cultivo de microalga *Arthrospira Platensis* como aditivo alimenticio para pollos de engorde. [Tesis de maestría, Universidad Esan] <https://repositorio.esan.edu.pe/handle/20.500.12640/1708>
- Draaisma, R., Wijffels, R., Slegers, P., Brentner, L., Roy, A., y Barbosa, M. (2013). Food commodities from microalgae. *Current opinion in biotechnology*, 24(2), 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2012.09.012>
- García, J., De Vicente, M., y Galan, B. (2018). Presente y futuro del cultivo de las microalgas para su uso como superalimentos. *Mediterráneo Económico*, 31, 333-350. <https://www.publicacionescajamar.es/publicacionescajamar/public/pdf/publicaciones-periodicas/mediterraneo-economico/31/31-806.pdf>
- Gómez, L. (2007). Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista cubana de química*, 19(2), 3-20. <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543707001.pdf>
- Hernández, A., y Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718->

19572014000200001

- Lam, M., y Lee, K. (2012). Microalgae biofuels: a critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology advances*, 30(3), 673-690. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.11.008>
- Lu, Y., Xiang, W., y Wen, Y. (2011). Spirulina (Arthrospira) industry in Inner Mongolia of China: current status and prospects. *Journal of applied phycology*, 23, 265-269. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9552-4>
- Lundquist, T., Woertz, I., Quinn, N., y Benemann, J. (2010). A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. Energy Biosciences Institute. [https://digitalcommons.calpoly.edu/cenv\\_fac/188/](https://digitalcommons.calpoly.edu/cenv_fac/188/)
- Madkour, F., Kamil, A., y Nasr, H. (2012). Production and nutritive value of Spirulina platensis in reduced cost media. *The egyptian journal of aquatic research*, 38(1), 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2012.09.003>
- Malpartida, R., Aldana, L., Sánchez, K., Gómez, L., y Lobo, J. (2022). El valor nutricional y compuestos bioactivos de la Espirulina: Potencial suplemento alimenticio. *Ecuadorian Science Journal*, 6(1), 42-51. <https://doi.org/10.46480/esj.6.1.133>
- Martín, S., y Lafuente, V. (2017). Referencias bibliográficas: indicadores para su evaluación en trabajos científicos. *Investigación bibliotecológica*, 31(71), 151-180. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-358X2017000100151&script=sci\\_abstract&tIng=pt](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-358X2017000100151&script=sci_abstract&tIng=pt)
- Martínez de Sousa, J. (1993). *Diccionario de bibliología y ciencias afines*. Fundación Germán Sánchez Ruipérez.
- Martínez, L. (2009). Eliminación de CO<sub>2</sub> con microalgas autóctonas [Tesis de Doctorado, Universidad de León. <https://buleria.unileon.es/handle/10612/1414>
- Morais, M., Radmann, E., Andrade, M., Teixeira, G., Bruschi, L., y Costa, J. (2009). Pilot scale semicontinuous production of Spirulina biomass in southern Brazil. *Aquaculture*, 294(1-2), 60-64. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.05.009>
- Morillo, M. (2001). Rentabilidad financiera y reducción de costos. *Actualidad*

contable *FACES*, 4(4), 35-48. <https://www.redalyc.org/pdf/257/25700404.pdf>

- Napolitano, G., Venditti, P., Agnisola, C., Quartucci, S., Fasciolo, G., Muscari Tomajoli, M., Geremia, E., Catone, C., y Ulgiati, S. (2022). Towards sustainable aquaculture systems: Biological and environmental impact of replacing fishmeal with *Arthrospira platensis* (Nordstedt) (spirulina). *Journal of Cleaner Production*, 374, 133978. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133978>
- Norsker, N., Barbosa, M., Vermuë, M., y Wijffels, R. (2011). Microalgal production—a close look at the economics. *Biotechnology advances*, 29(1), 24-27. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.08.005>
- Ponce, E. (2013). Superalimento para un mundo en crisis: Spirulina a bajo costo. *Idesia (Arica)*, 31(1), 135-139. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000100016>
- Posten, C. (2009). Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences*, 9(3), 165-177. <https://doi.org/10.1002/elsc.200900003>
- Ramírez, L., y Olvera, R. (2006). Uso tradicional y actual de spirulina sp. (*arthrospira* sp.). *Interciencia*, 31(9), 657-663.
- Raoof, B., Kaushik, B. D., & Prasanna, R. (2006). Formulation of a low-cost medium for mass production of *Spirulina*. *Biomass and bioenergy*, 30(6), 537-542. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.09.006>
- Richardson, J., Johnson, M., y Outlaw, J. (2012). Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. *Algal Research*, 1(1), 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2012.04.001>
- Ríos, S., Torres, C., Torras, C., Salvadó, J., Mateo, J., y Jiménez, L. (2013). Microalgae-based biodiesel: economic analysis of downstream process realistic scenarios. *Bioresource Technology*, 136, 617-625. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.046>
- Ruiz, J., Olivieri, G., de Vree, J., Bosma, R., Willems, P., Reith, J., Eppink, M., Kleinegriss, D., Wijffels, R., y Barbosa, M. (2016). Towards industrial products from microalgae. *Energy & Environmental Science*, 9(10), 3036-3043. <https://doi.org/10.1039/C6EE02000A>

org/10.1039/C6EE01493C

Sapag, N., Sapag, R., y Sapag, J. (2014). Preparación y evaluación de proyectos. Mc Graw Hill educación.

Shimamatsu, H. (2004). Mass production of Spirulina, an edible microalga. *Hydrobiologia*, 512(1-3), 39-44. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000020364.23796.04>

Slade, R., y Bauen, A. (2013). Micro-algae cultivation for biofuels: cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and bioenergy*, 53, 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.019>

Singh, G., y Patidar, S. (2018). Microalgae harvesting techniques: A review. *Journal of environmental management*, 217, 499-508. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.010>

Taylor, B., Xiao, N., Sikorski, J., Yong, M., Harris, T., Helme, T., Smallbone, A., Bhave, A., y Kraft, M. (2013). Techno-economic assessment of carbon-negative algal biodiesel for transport solutions. *Applied energy*, 106, 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.065>

Tredici, M. (2004). Mass production of microalgae: photobioreactors. A. Richmond (Eds), *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*, (pp.178-214). Backwell Science Ltd. <https://books.google.co.cr/>

Tredici, M. (2010). Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution. *Biofuels*, 1(1), 143-162. <https://doi.org/10.4155/bfs.09.10>

Tredici, M., Rodolfi, L., Biondi, N., Bassi, N., y Sampietro, G. (2016). Techno-economic analysis of microalgal biomass production in a 1-ha Green Wall Panel (GWP®) plant. *Algal Research*, 19, 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.005>

Vonshak, A., y Richmond, A. (1988). Mass production of the blue-green alga *Spirulina*: an overview. *Biomass*, 15(4), 233-247. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(88\)90059-5](https://doi.org/10.1016/0144-4565(88)90059-5)

Villalta, F., Murillo, F., Martínez, B., Valverde, J., Sánchez, A., y Guerrero, M. (2019). *Biología microalgal en Costa Rica: Oportunidades de negocio para el*

sector productivo nacional, Revista Tecnología en Marcha, 32(9), 85–93. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i9.4634>

Zhu, C., Ji, Y., Du, X., Kong, F., Chi, Z., y Zhao, Y. (2022). A smart and precise mixing strategy for efficient and cost-effective microalgae production in open ponds. *Science of The Total Environment*, 852, 158515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158515>