



Producción masiva de microorganismos para la obtención de proteína sustentable con alto valor biológico

Gamboa-Delgado, Julián; Márquez-Reyes, Julia Mariana; Godínez-Siordia, Daniel Enrique
Producción masiva de microorganismos para la obtención de proteína sustentable con alto valor biológico
CIENCIA *ergo-sum*, vol. 30, núm. 3, noviembre 2023-febrero 2024 | e215
Espacio del Divulgador

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Gamboa-Delgado, J., Márquez-Reyes, J. M. y Godínez-Siordia, D. E. (2023). Producción masiva de microorganismos para la obtención de proteína sustentable con alto valor biológico. *CIENCIA ergo-sum*, 30(3). <http://doi.org/10.30878/ces.v30n3a11>

Producción masiva de microorganismos para la obtención de proteína sustentable con alto valor biológico

Upscaling the production of microorganisms as a source of sustainable, high biological value proteins

*Julián Gamboa-Delgado**

Universidad Autónoma de Nuevo León, México

julian.gamboadlg@uanl.edu.mx

 <http://orcid.org/0000-0001-9041-1388>

Julia Mariana Márquez-Reyes

Universidad Autónoma de Nuevo León, México


julia.marquezrys@uanl.edu.mx

 <http://orcid.org/0000-0001-8632-2673>

Daniel Enrique Godínez-Siordia

Universidad de Guadalajara, México

dangos@costera.melaque.udg.mx

 <http://orcid.org/0000-0002-0986-5874>

Recepción: 28 de enero de 2022

Aprobación: 17 de mayo de 2022

RESUMEN

Se revisa el estado actual del uso de microorganismos como insumos alimenticios. Se enfatiza la producción de grupos microbianos tales como levaduras, bacterias, cianobacterias y microalgas, los cuales muestran un alto potencial para ser cultivados masivamente. Los alimentos derivados de la pesca y agricultura tienen un papel primordial al satisfacer las actuales necesidades poblacionales; sin embargo, el aumento de la producción de estos insumos se verá restringido debido a la sobrepesca y al límite de tierra arable disponible. Entre las diversas fuentes alternativas de nutrientes, la biomasa derivada de microorganismos ha sido considerada como un prometedor sustituto de las proteínas animales y vegetales debido a que presentan excelentes características nutricionales para humanos y para animales de cría.

PALABRAS CLAVE: microorganismos, nutrición humana, cianobacterias, microalgas, hongos unicelulares, proteína unicelular.

ABSTRACT

The present article reviews the current state of the production of microorganisms as a source of nutrients, with emphasis on microbial groups such as yeasts, bacteria, cyanobacteria and microalgae, which have shown a high potential for massive production. Food derived from fisheries and agriculture plays an important role in satisfying the current human population needs. However, it is forecast that the growth of these industries will be restricted due to overfishing and unavailability of arable land. Among the alternative sources of nutrients, the biomass produced from several microbes has been considered a promising substitute for the proteins currently supplied by plants and animals. Many microorganisms can thus be a source of nutritious, sustainable ingredients for both, human populations and livestock.

KEYWORDS: microorganisms, human nutrition, cyanobacteria, microalgae, unicellular fungi, single cell protein.

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la agricultura y la pesca suele atribuirse al mejoramiento de las técnicas de producción. Conforme las industrias de estos sectores se desarrollan y los métodos de producción se intensifican, se genera un mayor aporte de alimentos para las poblaciones humanas y para la crianza de animales. Pronósticos confiables indican que el crecimiento de las industrias pecuarias puede disminuir a causa de futuras restricciones en los insumos e ingredientes requeridos para la producción animal. Entre estos insumos, se prefieren las harinas de origen vegetal

*AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

julian.gamboadlg@uanl.edu.mx

y animal debido a sus buenas propiedades nutricionales. Sin embargo, la producción de algunas materias primas, como lo es la harina de pescado, trae consigo preocupaciones de índole económica y ambiental. Además, existe un límite global de la tierra arable disponible, lo cual a su vez impone restricciones a la producción agrícola tradicional. En consecuencia, los esfuerzos para encontrar ingredientes sustentables y alternativos para crianza animal constituyen pasos importantes que garanticen una seguridad alimentaria de las poblaciones humanas. Las restricciones mencionadas y los rápidos desarrollos biotecnológicos permiten suponer que la próxima generación de nutrientes estará significativamente representada por aquellos derivados de los microorganismos. Una gran cantidad de estudios nutricionales se han enfocado en la evaluación de nutrientes no convencionales, en primera instancia, para la nutrición animal y, desde hace poco, para la nutrición humana. Este artículo compila resultados recientes acerca de investigaciones enfocadas a la producción masiva de microorganismos y a la vez enfatiza en los nuevos usos y aplicaciones de diversos tipos de biomasa microbiana. Para finalizar, aborda los logros alcanzados por empresas dedicadas a esta actividad, así como las perspectivas relevantes a la nutrición humana y a la nutrición de animales de crianza.

1. VENTAJAS DEL CULTIVO DE MICROORGANISMOS Y SUS PRODUCTOS

El término *proteína unicelular* (SCP por sus siglas en inglés) fue acuñado en 1966 por Carol L. Wilson en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (Suman *et al.*, 2015). Se refiere colectivamente a la biomasa ya sea procesada o extraída de cultivos de microorganismos. Esta biomasa presenta un alto potencial para utilizarse como ingrediente o alimento humano o como alimento alternativo para animales de crianza. Las ventajas del uso de microorganismos para la producción de biomasa o harinas microbianas se han demostrado bastante. Las más relevantes se enlistan a continuación.

1. 1. Rápido crecimiento y alto rendimiento por unidad de área

Bajo condiciones óptimas, los microorganismos exhiben unas tasas de crecimiento difíciles de superar por otros organismos. Se han estimado ganancias de 1 kg de proteína en un día de crecimiento de un bovino de 500 kg, mientras que 500 kg de levadura producirían varias toneladas de proteína en un solo día. La empresa Marlow Foods Limited en Reino Unido produce una micoproteína derivada del microhongo *Fusarium venenatum*, la cual se usa para elaborar un amplio rango de alimentos comercializados en varios países como sustitutos de carne desde 1985. El proceso patentado genera a diario hasta siete toneladas de biomasa derivada de este moho del suelo (Wiebe, 2002). Otro ejemplo es el que representan las microalgas, las cuales al ser cultivadas de manera intensiva en estanques se calcula que produzcan más de 40 toneladas de proteína por hectárea al año (Weyer *et al.*, 2010). En comparación, este rendimiento es hasta diez veces más alto que la producción estándar de soya y mayor que la producción de maíz (Pelczar y Chan, 2010). Una ventaja adicional es que muchos microorganismos pueden cultivarse en sistemas de tres dimensiones (largo, ancho y alto), a diferencia del tradicional sistema agrícola de dos dimensiones en donde no se aprovecha la altura para los cultivos, excepto en los sistemas hidropónicos y acuapónicos.

1. 2. Valor nutricional

Una gran cantidad de microorganismos presenta buenos perfiles nutricionales tanto para el consumo humano como para el consumo de animales de cría. En general, las células completas de microalgas, levaduras y bacterias contienen un alto contenido de proteína (cuadro 1). El valor biológico de una proteína depende de su digestibilidad y de su composición de aminoácidos esenciales. Se considera que este valor es alto cuando las proporciones de aminoácidos son las adecuadas para fomentar el crecimiento de un organismo específico. Las proteínas derivadas de muchos mi-

croorganismos han sido consideradas como portadoras de un alto valor biológico gracias a los apropiados perfiles de aminoácidos para los organismos consumidores (Gamboa-Delgado y Márquez-Reyes, 2018). Por otro lado, el contenido de lípidos tiende a ser mayor en la biomasa derivada de las microalgas, mientras que la biomasa de bacterias y levaduras suele ser rica en proteína, pigmentos y vitaminas. Aunado a esto, se ha reportado que el perfil nutricional de bacterias y microalgas mejora significativamente mediante el uso de medios de cultivo y condiciones específicas de crecimiento (Ray *et al.*, 2022). Algunos tipos de bacterias tienen paredes celulares que resultan más digeribles que aquellas encontradas en las microalgas y levaduras. A pesar de que las paredes celulares resultan indigeribles para algunos organismos consumidores, también representan una importante fuente de nutrientes debido a que se componen en su mayoría de polisacáridos y proteína. Cuando se compara con otros ingredientes, la biomasa microbiana representa una fuente insuperable de ácidos nucleicos.

CUADRO 1

Comparación de características nutricionales de microalgas, bacterias, levaduras y una harina de origen animal*

	Proteína	Lípidos	Cenizas	Ácidos nucleicos
Microalgas	6-62	3-45	8-43	3-8
Levaduras	45-55	1-6	5-10	6-15
Bacterias	50-65	1-3	3-7	8-12
Harina de pescado	59-74	8-14	10-22	0.2-0.6

Fuente: Gamboa-Delgado y Márquez-Reyes, 2018.

Nota: *rangos de composición porcentual en base seca.

Por ejemplo, se ha reportado que hasta el 20% del nitrógeno en la levadura de cerveza *Saccharomyces cerevisiae* (una fuente microbiana utilizada en nutrición animal) proviene de su ácido nucleico (Rumsey *et al.*, 1991). Hoy en día, varias compañías consolidadas han patentado métodos de producción de biomasa bacteriana, la cual ha sido considerada como una fuente sostenible de proteínas de alta calidad. Otras bioempresas emergentes se enfocan en la producción de biomasa bacteriana a partir de sustratos alternativos y económicos. El uso de metano y desechos derivados de actividades agrícolas y de la industria alimentaria han sido útiles para producir microorganismos benéficos y comestibles. Estas investigaciones y sus procesos patentados han establecido la base para productos comerciales tales como Profloc® (Nutrinsic) y FeedKind® (Calysta), los cuales han sido dirigidos en específico al sector de la nutrición animal como ingredientes de reemplazo de las proteínas de origen animal (Chen *et al.*, 2022; Gamboa-Delgado *et al.*, 2020; Olivares *et al.*, 2019).

1. 3. Versatilidad para su cultivo

Los sistemas para producir biomasa a partir de microorganismos son muy variados y pueden consistir en fermentadores, fotobiorreactores y diversos tipos de contenedores. Un gran número de especies de microorganismos son tolerantes a amplios rangos de temperatura, salinidad y a otros parámetros fisicoquímicos. Aunado a esto, son muy eficientes al convertir una variedad de sustratos a partir de los cuales obtienen sus nutrientes, lo cual deriva en una versátil y rápida producción de biomasa microbiana. Por otro lado, los microorganismos también se clasifican de acuerdo con las fuentes de carbono y energía que son capaces de utilizar. Dicha diversidad metabólica ha permitido su producción sustentable a través de una amplia gama de fuentes de energía (luz solar o luz artificial para las microalgas y cianobacterias) y sustratos de carbono, que van desde agares comerciales hasta residuos agrícolas, efluentes de fábricas de alimentos y gas metano (Lim *et al.*, 2021; Owsianiak *et al.*, 2022). Las técnicas de producción existentes se pueden adaptar a esta diversa variedad metabólica microbiana (tabla 1) y, gracias a la ingeniería genética, también es posible lograr lo contrario, es decir, adaptar genéticamente los microorganismos a las técnicas y condiciones de producción disponibles.

TABLA 1
Grupos de microorganismos utilizados con más frecuencia como fuente de lípidos, pigmentos y proteínas orientadas a la nutrición humana y animal

Microorganismo/ género	Contenido de proteína (%)	Tipo de metabolismo	Sustratos para su crecimiento	Referencias
Microalgas <i>Chlorella</i> <i>Dunaliella</i> <i>Schizochytrium</i>	51-58 57 12-16	Autótrofo/heterótrofo Autótrofo/heterótrofo Autótrofo/heterótrofo	Medios de cultivo tradicionales con fertilizantes inorgánicos, sustratos ricos en carbón, efluentes de la industria de los alimentos	Becker, 2007; Chavoshi <i>et al.</i> , 2019; Wang <i>et al.</i> , 2022
Levaduras <i>Saccharomyces</i> <i>Fusarium</i> <i>venenatum</i>	28-45 44	Heterótrofo Heterótrofo	Mezclas orgánicas y minerales, agua geotermal como fuente mineral, extractos fúngicos, fermentación con glucosa, jarabes vegetales	Derbyshire y Finnigan, 2022; Hosseini, 2009; Wiebe, 2002
Bacterias <i>Methylococcus</i> <i>capsulatus</i> <i>Corynebacterium</i> <i>ammoniaenes</i>	68-81 61	Quimioautótrofo/ metanótrofo Quimioautótrofo	Metano derivado de la fermentación de desechos, gas natural Agares tradicionales, desechos sólidos de la industria agrícola	Øverland <i>et al.</i> , 2010; Sakarika <i>et al.</i> , 2022; An <i>et al.</i> , 2018
Cianobacterias <i>Arthrospira</i>	46-71	Fotoautótrofo	Medios químicos, efluentes de descargas industriales, tequesquite (recurso mineral tradicional)	Lim <i>et al.</i> , 2021; Martínez-Jerónimo <i>et al.</i> , 2017

Fuente: elaboración propia.

Nota: se indican los sustratos tradicionales y alternativos usados para su producción masiva.

1. 4. Exitoso escalamiento de la producción

Gracias a la investigación aplicada, la generación continua de biomasa microbiana en fermentadores y fotobiorreactores ha alcanzado una escala industrial. En la actualidad, las metodologías establecidas permiten predecir un incremento significativo en el número de especies cultivadas, así como en el rango de aplicaciones en la nutrición humana y en la nutrición animal. El escalamiento comienza con la selección cuidadosa del microorganismo que se va a cultivar. El aislamiento de las primeras células y los cultivos iniciales son altamente controlados, ya que son cruciales para el eventual escalamiento a volúmenes mayores (figura 1). Muchos de los nuevos métodos de producción son independientes de las condiciones estacionales y pueden funcionar de manera continua; algunos de estos métodos de producción son capaces de generar, a partir de insumos no onerosos, biomasa bacteriana con calidad nutricional consistente. Diversos procesos industriales bien establecidos han apoyado el incremento de producción de microalgas, levaduras y bacterias. La biomasa representaría el producto final o también puede ser un subproducto de un proceso primario, como en el caso de la producción de pigmentos y biocombustibles a partir de las microalgas (Gamboa-Delgado y Márquez-Reyes, 2018).

1. 5. Múltiples usos y una creciente demanda

Los productos derivados de microorganismos han sido dirigidos a una amplia variedad de propósitos. En el caso de la nutrición humana, los lactobacilos y varios hongos unicelulares han sido producidos durante siglos para manufacturar alimentos y bebidas. Por otro lado, cianobacterias, tales como *Spirulina* (*Arthrospira*) y microalgas como *Chlorella*, tienen hoy por hoy una amplia aceptación como suplementos dietarios. Varios productos mantienen un consumo y demanda considerables en varios países y representan la forma más común en la cual los humanos consumen directamente biomasa microbiana. Sin embargo, se espera un mayor consumo futuro de este tipo de productos, ya que al surgir nuevos tipos de ingredientes derivados de microorganismos, la industria de los alimentos encuentra rápidamente formas efectivas para incluirlos en diversos productos. En la alimentación animal, la biomasa de levaduras es suministrada en las dietas como aporte de vitaminas, pigmentos, proteínas

y aminoácidos específicos. También, se ha demostrado su papel como promotor de buena palatabilidad y como un agente potenciador de la respuesta inmune en animales terrestres y acuáticos. Algunos de los usos no nutricionales de los microorganismos incluyen la extracción de lípidos para obtener biocombustibles, además de su creciente papel en la biotecnología y remediación de efluentes contaminados (Leong y Chang, 2020; Moshood *et al.*, 2021).

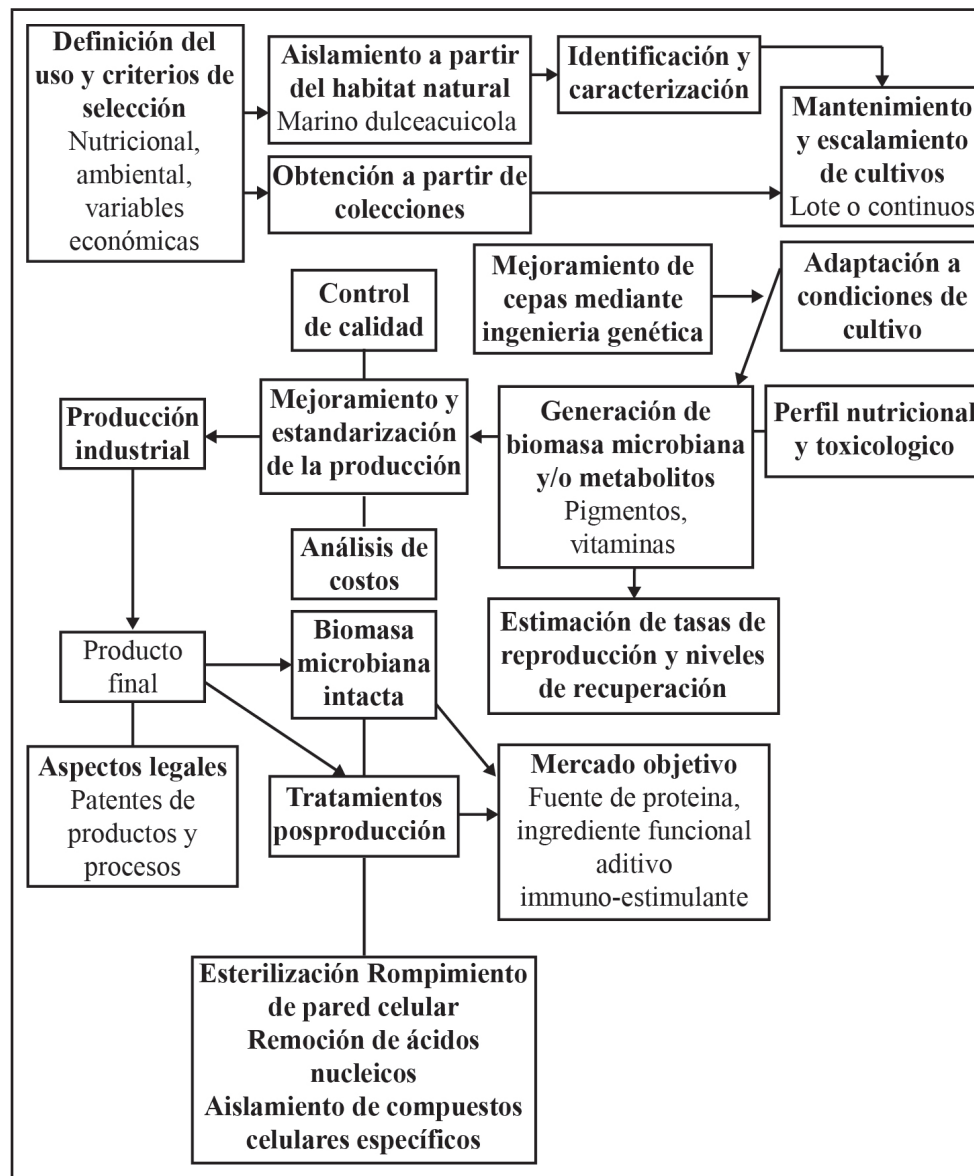


FIGURA 1

Principales etapas en la producción de microorganismos con potencial para generar biomasa microbiana o compuestos específicos útiles en la nutrición humana y en la nutrición animal

Fuente: Gamboa-Delgado y Márquez-Reyes, 2018.

2. GRUPOS ESPECÍFICOS DE MICROORGANISMOS Y SU POTENCIAL PARA PRODUCIR NUTRIENTES

2. 1. Bacterias

En cuanto a los ya conocidos lactobacilos, estudios recientes han demostrado que la biomasa bacteriana derivada de la fermentación de gas natural es una fuente prometedora de proteína para varios usos. Esta biomasa bacteriana (cultivos bacterianos de *Methylococcus capsulatus*) se ha probado con éxito en animales vertebrados e invertebrados,

a los cuales se les suministra dietas con diferentes porcentajes de estos ingredientes alternativos (Glencross *et al.*, 2023). De la misma forma, biomasa derivada de la bacteria *Corynebacterium ammoniagenes* (una pequeña bacteria que habita en diversos tipos de suelos) ha sido probada como un ingrediente funcional en dietas formuladas para aves de crianza (An *et al.*, 2018). En este momento, el cultivo de muchas otras especies de bacterias y sus efectos nutricionales en humanos y animales se encuentran en investigación. Las bacterias presentan una amplia adaptabilidad metabólica, lo cual facilita su cultivo experimental en medios de cultivo alternativos y de fácil adquisición (metano y efluentes de la industria de los alimentos), lo cual con frecuencia conlleva a la disminución en los costos de producción y al posterior escalamiento industrial. En el cultivo de varias especies acuáticas existe un método de producción en el cual se fomenta la formación de bioflóculos bacterianos en el agua, los cuales son a su vez aprovechados como alimento por peces y crustáceos de valor comercial (El-Sayed, 2021).

2. 2. Cianobacterias

A diferencia de las bacterias, las cianobacterias tienen la capacidad fisiológica para realizar fotosíntesis y, por lo tanto, capturan la energía luminosa y la convierten en energía química. En nuestro país, resalta el consumo histórico de una de las cianobacterias más conocidas en nuestros días, la espirulina (*Arthrospira máxima*, figura 2), cuyo uso se remonta a la época prehispánica cuando los aztecas las colectaban en los sistemas lacustres del valle de México. Conocida como *tecuitlatl*, las masas de color verde-azul eran secadas y consumidas en pequeñas cantidades e incluso usadas como condimento (Ramírez-Moreno y Olvera-Sánchez, 2006). Las sobresalientes características nutricionales de cianobacterias, tales como *Arthrospira máxima* o *Arthrospira platensis*, han sido reconocidas a nivel global y en muchas ocasiones se hace referencia a estos productos como superalimentos (Al-Fadhly *et al.*, 2022). Las cianobacterias del género *Arthrospira* son muy resistentes a la variación de las diversas condiciones de cultivo y existen metodologías y manuales de producción que se pueden obtener con facilidad.

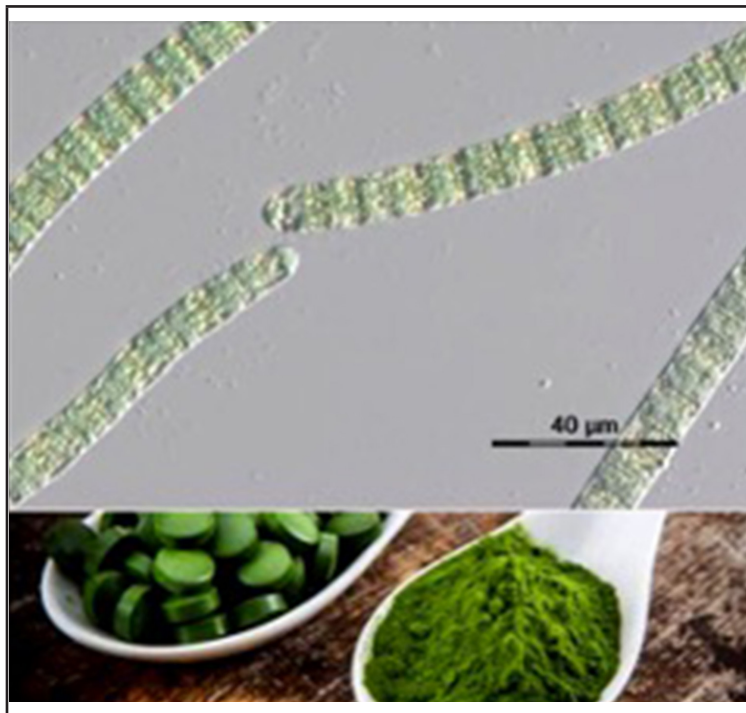


FIGURA 2

Células vivas de la cianobacteria *Arthrospira maxima* (espirulina) y ejemplos de productos procesados a partir de su biomasa

Fuente: EPSAG, Goettingen University y PlantPills Wiki.^[1]

2. 3. Microalgas de agua dulce y marinas

La producción masiva de diferentes especies de microalgas marinas ha sido una actividad intrínseca al cultivo de varios organismos acuáticos con valor comercial tales como los camarones y diversas especies de peces marinos. Las microalgas se usan en la alimentación de las etapas larvales de estos organismos, e incluso en la etapa adulta en el caso de los moluscos bivalvos. De igual forma, se cultivan grandes cantidades de microalgas para enriquecer nutricionalmente (bioencapsular) zooplancton, el cual a su vez es suministrado como alimento. En vista de lo anterior, ya se cuenta con tecnologías bien establecidas para el escalamiento exitoso de la producción (Merlo *et al.*, 2021). En las últimas décadas se ha explorado la producción de microalgas para el desarrollo de biocombustibles a partir de su biomasa. Otros sectores industriales han desarrollado tecnologías para elaborar productos específicos para la nutrición humana. Por ejemplo, varias especies de microalgas pertenecientes al género *Chlorella* son actualmente cultivadas y destinadas a un amplio rango de objetivos, entre ellos su uso como alimento directo, la extracción de pigmentos carotenoides, usos farmacéuticos, generación de biocombustibles y tratamiento de aguas residuales (Gorgich *et al.*, 2021). *Chlorella* es una microalga muy robusta, tolerante a amplios rangos de luz, temperatura y salinidad y además puede crecer en diversos medios de cultivo no onerosos. Otra microalga verde de agua dulce es *Haematococcus pluvialis*, la cual se ha producido durante varios años para extraer pigmentos valiosos con fines comerciales, tales como la astaxantina (figura 3).



FIGURA 3

Ejemplos de sistemas para el cultivo intensivo de microalgas^[2]

Fuente: Tree hugger y Cyanotech Corporation.

Nota: las imágenes muestran unidades de cultivo de la microalga *Haematococcus pluvialis*.

2. 4. Hongos microscópicos

Por tradición, las levaduras han sido la forma más típica en la cual los humanos consumen hongos microscópicos, siendo la más común *Saccharomyces cerevisiae*, la cual se emplea en panificación como un agente de fermentación que convierte los compuestos fermentables de la masa en bióxido de carbono. De igual forma, dos especies de hongos unicelulares filamentosos que habitan naturalmente en suelos, y que no son patógenos, han sido sujetos a extensivas investigaciones orientadas a su uso como alimento humano. El primero es *Fusarium venenatum* (figura 4), el cual ha sido producido durante décadas para manufacturar diversos productos categorizados como “análogos de carne a base de mico-proteínas” (Quorn) (Ahmad *et al.*, 2022). Los productos manufacturados a partir de este microhongo se comercializan en ocho países europeos, además de Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda y Filipinas.



FIGURA 4

Filamentos y ramificaciones del microhongo *Fusarium venenatum*^[3]

Fuente: Finnigan *et al.*, 2017; Marlow Foods Ltd. (Reino Unido).

El segundo hongo microscópico comestible es *Aspergillus oryzae*, el cual es muy utilizado en la cocina japonesa como un agente fermentador. *Aspergillus oryzae* ha llamado la atención no sólo por sus buenas propiedades nutricionales, sino porque tiene un alto potencial para su producción industrial gracias a su capacidad natural para crecer en medios alternativos, tales como material orgánico de efluentes residuales, desechos de la manufactura del papel y vinazas (Uwineza *et al.*, 2021). Aplicaciones emergentes de los hongos microscópicos tanto nutricionales, inmunológicas y biotecnológicas indican que la demanda de estos microorganismos se incrementará.

Las técnicas de producción muestran una tendencia hacia producciones más eficientes y económicas; sin embargo, el uso de los microhongos es una actividad relativamente nueva que requiere mayor investigación sobre posibles efectos fisiológicos adversos (*e. g.* generación de alergias) promovidos tanto en humanos como en animales.

3. ¿CÓMO ESTIMAR EL DESEMPEÑO NUTRICIONAL DE LOS MICROORGANISMOS?

3. 1. Palatabilidad

La palatabilidad dietaria es una característica organoléptica que conduce al inicio y continuación de la respuesta alimenticia. La mayoría de las sustancias que estimulan a las células olfativas y gustativas se caracterizan por tener bajo peso molecular, tales como los aminoácidos y los nucleótidos. El alto contenido de nucleótidos en los microorganismos los convierte en eficientes agentes para mejorar la palatabilidad de los productos alimenticios (Alloul *et al.*, 2022). Los extractos de levadura se usan a menudo en la industria de los alimentos como mejoradores del sabor, en particular debido al alto contenido de ácido glutámico y nucleótidos. En este sentido, la adición de pequeñas cantidades de levadura a las dietas balanceadas para diversos animales mejoraría su atractabilidad y aceptación; sin embargo, al aplicarse en altas concentraciones, las levaduras afectan de forma negativa el sabor de los alimentos. Las pruebas de palatabilidad consisten en estudios observacionales relativamente sencillos y permiten determinar si un ingrediente o dieta es aceptada (palatable) o rechazada (deterrente) por un organismo experimental.

3. 2. Digestibilidad y asimilación

La digestibilidad aparente provee un indicador de la disponibilidad de los nutrientes, y, por lo tanto, puede utilizarse como parte de los criterios de selección de ingredientes tanto alternativos como tradicionales. La digestibilidad de un ingrediente o insumo depende sobre todo de su composición química y de la fisiología digestiva de la especie receptora. Varios estudios han sido desarrollados para explorar la digestibilidad de diferentes fuentes de biomasa microbiana en especies animales. Estos estudios han demostrado que la biomasa microbiana tiende a mostrar una alta digestibilidad. Por ejemplo, en bioensayos realizados con camarón, se ha observado que la levadura genera coeficientes de digestibilidad similares a aquellos obtenidos para la harina de pescado (Villarreal-Cavazos *et al.*, 2019). En un estudio sobre nutrición de peces, Sarker *et al.* (2015) desarrollaron un experimento con tilapia del Nilo y reportaron alta digestibilidad de los aminoácidos suministrados por microalgas *Schizochytrium* y cianobacterias *Arthrospira*. La fragmentación de la pared celular incrementa la digestibilidad y el valor nutricional de las levaduras al ser suministradas en dietas para peces y crustáceos.

La incorporación final de los nutrientes en los tejidos de los organismos consumidores (asimilación) se evalúa por medio de varias metodologías. Las técnicas aplicadas con más frecuencia para estimar asimilación recurren a algún biomarcador natural (firma isotópica, perfil de aminoácidos). Dichas técnicas hoy se aplican con frecuencia en estudios de ecología y nutrición para trazar nutrientes desde los alimentos hasta los tejidos (Gamboa-Delgado, 2022). En nutrición animal han permitido evaluar la utilización fisiológica de los nutrientes derivados de ingredientes alternativos, como lo es el caso de la biomasa microbiana. En estos bioensayos, los animales son alimentados con dietas formuladas con diferentes proporciones de un ingrediente de referencia (proteína animal) y diferentes proporciones de ingredientes experimentales (proteínas vegetales o microbianas). En general, los resultados de tales experiencias indican que las proteínas de origen microbiano son asimiladas igual o con más rapidez que las proteínas de origen vegetal o animal y, además, contribuyen en altas proporciones a la biosíntesis de tejido muscular (Gamboa-Delgado y Márquez-Reyes, 2018). Sin embargo, estos estudios también han indicado que al sustituir los ingredientes tradicionales por niveles muy altos de biomasa microbiana se genera una disminución en la tasa de crecimiento de los animales.

4. ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA MICROBIANA

El incremento en el consumo de alimentos ha provocado una fuerte demanda de los insumos requeridos para su manufactura, lo cual, a su vez, ha ejercido una fuerte presión sobre los recursos naturales. Esta demanda de recursos causa impactos ambientales negativos e incrementa el precio en los alimentos. Los costos de producción estimados para generar un kilogramo de biomasa microbiana son altamente variables (de 1 a 70 dólares por kilogramo de biomasa seca) (Gamboa-Delgado y Márquez-Reyes, 2018). Sin embargo, se ha observado una reducción general y progresiva en los costos de manufactura gracias a que se han implementado nuevas tecnologías, en particular para las bacterias y levaduras. Los principales costos de producción se atribuyen a la obtención de sustratos para los cultivos y a la energía requerida para las operaciones de cosecha, secado y transporte. Por otro lado, técnicas de manufactura novedosas se han enfocado en el uso de sustratos no convencionales para producir biomasa microbiana en una forma sustentable y económica. En la actualidad, métodos alternativos para obtener levaduras y bacterias a partir del uso de sustratos derivados de efluentes y desechos de las industrias agrícolas y alimenticias, se encuentran en etapa experimental o piloto comercial (Choi *et al.*, 2022; Lim *et al.*, 2021). Sin embargo, como se mencionó, otros procesos ya han sido estandarizados, escalados y patentados. Algunos de estos productos están orientados al sector de la nutrición de animales de crianza tanto terrestres como acuáticos.

CONCLUSIONES

Las características nutricionales y la alta capacidad de crecimiento que muestran varias especies de microorganismos permiten predecir un significativo aumento en sus aplicaciones dentro de la nutrición humana y también dentro de la nutrición animal. En cuanto a esto, investigaciones recientes indican que la aptitud nutricional de los microorganismos puede ser muy alta, ya que suministran proteína, lípidos, vitaminas y pigmentos a los consumidores. Además de la importancia estructural de algunos nutrientes como contribuyentes a la biosíntesis de nuevos tejidos, se ha demostrado que otros componentes presentes en los microorganismos representan ingredientes funcionales que promueven actividades fisiológicas significativas, tales como la estimulación del sistema inmunológico. Adicionalmente, las funciones que desempeñan varios de estos componentes microbianos como prebióticos y probióticos conllevan al establecimiento de un microbioma intestinal sano. Una gran cantidad de especies de microorganismos se mantienen vivos y disponibles en colecciones institucionales. Sin embargo, algunas especies no han sido investigadas respecto a sus diversos potenciales. Otros microorganismos ni siquiera han sido descubiertos aún; por lo tanto, existe un alto potencial para la investigación y desarrollo futuro de otras técnicas de producción. Los actuales procesos industriales de producción aplicados a los microorganismos son cada vez más sofisticados y eficientes. Varios de estos procesos se han enfocado en utilizar la sobresaliente diversidad metabólica de los microorganismos para permitir su crecimiento en sustratos desechados por otras industrias. Lo anterior conlleva a un menor uso de recursos e impacto ambiental y permite que tales procesos se desarrollen en una forma redituable y sustentable. Como nota final, es muy probable que las actuales tecnologías de producción y las nuevas innovaciones sigan contribuyendo a la seguridad alimentaria mediante el impulso al aumento de la producción de microorganismos. Una vez alcanzada la escala de producción industrial, se obtendrán beneficios directos para la nutrición animal y eventualmente para la nutrición humana.

PROSPECTIVA

Las técnicas de producción de microorganismos y los nuevos métodos para mejorar el valor nutricional de los productos finales son dos de los aspectos que determinarán qué tan rápido aumenta el actual uso de la biomasa microbiana en la nutrición humana y en la nutrición animal. En estos momentos, una intensiva investigación se desarrolla en diversas instituciones educativas y empresas orientadas a la producción de los recursos derivados

de microorganismos. Aunado a esto, los métodos industriales más avanzados para generar biomasa microbiana corresponden a aquellos aplicados a la producción de levaduras y microalgas. Un aspecto relevante consiste en que la producción de microorganismos conlleva menor impacto al ambiente que el provocado por otras industrias. Por ejemplo, la producción de micoproteínas para manufacturar alimentos análogos de carne genera una huella de carbono hasta 90% menor que la de la producción de carne de bovinos, y por otro lado, se requiere hasta veinte veces menos volumen de agua para su procesado en comparación con el ganado (Hashempour-Baltork *et al.*, 2020). Además, el uso de materiales obtenidos de efluentes industriales como sustratos de crecimiento microbiano implica una tendencia hacia economías circulares más sustentables. Algunos de los problemas por resolver en la producción de microorganismos son de índole técnico-nutricional; por ejemplo, la pared celular de las microalgas representa hasta el 10% de su peso y constituye un problema para su completa digestión en humanos y organismos no rumiantes. Los procedimientos innovadores para romper la pared celular han permitido incrementar la biodisponibilidad nutricional. Otro desafío lo representa el típicamente alto contenido de ácidos nucleicos presentes en la biomasa microbiana. Por ejemplo, la levadura contiene entre 6 y 15% de ácidos nucleicos comparado al 2% en los productos cárnicos. En nutrición humana, un contenido de ácidos nucleicos de 1% en los alimentos ingeridos es considerado como el límite superior. Los animales terrestres tampoco son capaces de tolerar altos niveles de nucleótidos dietarios debido a que estos incrementan el ácido úrico. Se requieren estudios adicionales para adecuar, mediante nuevos tratamientos postcosecha, las diferentes formas de biomasa microbiana a la nutrición humana.

AGRADECIMIENTOS

Los coautores agradecen a los revisores(as) anónimos(as) por su tiempo y esfuerzo en sus observaciones, ya que contribuyeron a mejorar y orientar este manuscrito hacia ideas más claras.

REFERENCIAS

- Ahmad, M. I., Farooq, S., Alhamoud, Y., Li, C., & Zhang, H. (2022). A review on mycoprotein: History, nutritional composition, production methods, and health benefits. *Trends in Food Science and Technology*, 121, 14-29.
- AlFadhly, N. K., Alhelfi, N., Altemimi, A. B., Verma, D. K., Cacciola, F., & Narayanankutty, A. (2022). Trends and technological advancements in the possible food applications of Spirulina and their health benefits: A Review. *Molecules*, 27(17), 5584.
- Alloul, A., Spanoghe, J., Machado, D., & Vlaeminck, S. E. (2022). Unlocking the genomic potential of aerobes and phototrophs for the production of nutritious and palatable microbial food without arable land or fossil fuels. *Microbial biotechnology*, 15(1), 6-12.
- An, B. K., Choi, Y. I., Kang, C. W., & Lee, K. W. (2018). Effects of dietary Corynebacterium ammoniagenes-derived single cell protein on growth performance, blood and tibia bone characteristics, and meat quality of broiler chickens. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 27(2), 140-147.
- Becker, E.W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25, 207-210.
- Chavoshi, Z. Z., & Shariati, M. (2019). Lipid production in *Dunaliella salina* under autotrophic, heterotrophic, and mixotrophic conditions. *Biologia*, 74, 1579-1590.
- Chen, Y., Chi, S., Zhang, S., Dong, X., Yang, Q., Liu, H., Tan, B., & Xie, S. (2022). Evaluation of Methanotroph (*Methylococcus capsulatus*, Bath) bacteria meal on body composition, lipid metabolism, protein synthesis and muscle metabolites of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture*, 547, 737517.
- Choi, K. R., Yu, H. E., & Lee, S. Y. (2022). Microbial food: microorganisms repurposed for our food. *Microbial Biotechnology*, 15(1), 18-25.
- Derbyshire, E. J., & Finnigan, T. J. (2022). Mycoprotein: A futuristic portrayal. In *Future Foods* (pp. 287-303). Utah: Academic Press.

- El-Sayed, A. F. M. (2021). Use of biofloc technology in shrimp aquaculture: a comprehensive review, with emphasis on the last decade. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 676-705.
- Finnigan, T., Needham, L., & Abbott, C. (2017). Mycoprotein: a healthy new protein with a low environmental impact. In *Sustainable Protein Sources* (pp. 305-325). Utah: Academic Press.
- Gamboa-Delgado, J. (2022). Isotopic techniques in aquaculture nutrition: State of the art and future perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 456-476.
- Gamboa-Delgado, J., Nieto-López, M. G., Maldonado-Muñiz, M., Villarreal-Cavazos, D., Tapia-Salazar, M., & Cruz-Suárez, L. E. (2020). Comparing the assimilation of dietary nitrogen supplied by animal-, plant- and microbial-derived ingredients in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*: A stable isotope study. *Aquaculture Reports*, 17, 100294.
- Gamboa-Delgado, J. & Márquez-Reyes J. M. (2018). Potential of microbial-derived nutrients for aquaculture development. *Reviews in Aquaculture*, 10(1), 224-246.
- Glencross, B., Muñoz-Lopez, P., Matthew, C., MacKenzie, S., Powell, A., Longshaw, M., & LeBlanc, A. (2023). Digestibility of bacterial protein by Atlantic salmon (*Salmo salar*) is affected by both inclusion level and acclimation time. *Aquaculture*, 565, 739137.
- Gorgich, M., Martins, A. A., Mata, T. M., & Caetano, N. S. (2021). Composition, cultivation and potential applications of *Chlorella zofingiensis*—A comprehensive review. *Algal Research*, 60, 102508.
- Hashempour-Baltork, F., Khosravi-Darani, K., Hosseini, H., Farshi, P., & Reihani, S. F. S. (2020). Mycoproteins as safe meat substitutes. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119958.
- Hosseini, S. M., Khosravi-Darani, K., Mohammadifar, M. A., & Nikoopour, H. (2009). Production of mycoprotein by *Fusarium venenatum* growth on modified vogel medium. *Asian Journal of Chemistry*, 21(5), 4017.
- Leong, Y. K., & Chang, J. S. (2020). Bioremediation of heavy metals using microalgae: recent advances and mechanisms. *Bioresource Technology*, 303, 122886.
- Lim, H. R., Khoo, K. S., Chew, K. W., Chang, C. K., Munawaroh, H. S. H., Kumar, P. S., & Show, P. L. (2021). Perspective of Spirulina culture with wastewater into a sustainable circular bioeconomy. *Environmental Pollution*, 284, 117492.
- Martínez-Jerónimo, F., Flores-Hernández, D. I., & Galindez-Mayer, J. (2017). Formulation of an alternative culture medium for *Arthrospira maxima* (Spirulina) based on “tequesquite,” a traditional mineral resource. *Journal of the World Aquaculture Society*, 48(6), 887-897.
- Merlo, S., Gabarrell Durany, X., Pedrosa Tonon, A., & Rossi, S. (2021). Marine microalgae contribution to sustainable development. *Water*, 13(10), 1373.
- Moshood, T. D., Nawarir, G., & Mahmud, F. (2021). Microalgae biofuels production: A systematic review on socio-economic prospects of microalgae biofuels and policy implications. *Environmental Challenges*, 5, 100207.
- Nouska, C., Mantzourani, I., Alexopoulos, A., Bezirtzoglou, E., Bekatorou, A., Akrida-Demertzi, K., Demertzis P., & Plessas, S. (2015). *Saccharomyces cerevisiae* and kefir production using waste pomegranate juice, molasses, and whey. *Czech Journal of Food Sciences*, 33, 77-282.
- Olivares, J. A., Puyol, D., Melero, J. A., & Dufour, J. (2019). *Wastewater treatment residues as resources for biorefinery products and biofuels*. Elsevier. The Netherlands.
- Øverland, M., Tauson, A.-H., Shearer, K., & Skrede, A., (2010). Evaluation of methane-utilising bacteria products as feed ingredients for monogastric animals. *Archives of Animal Nutrition*, 64, 171-89.
- Owsianiak, M., Pusateri, V., Zamalloa, C., De Gussem, E., Verstraete, W., Ryberg, M., & Valverde-Pérez, B. (2022). Performance of second-generation microbial protein used as aquaculture feed in relation to planetary boundaries. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106158.
- Pelczar, M. J., & Chan, E. C. S. (2010). *Microbiology: An application based approach*. New Delhi: Tata McGraw Hill.
- Ramírez-Moreno, L., & Olvera-Ramírez R. (2006). Uso tradicional y actual de *Spirulina* sp. (*Arthrospira* sp.). *Interciencia*, 31(9), 657-663.

- Ray, A., Nayak, M., & Ghosh, A. (2022). A review on co-culturing of microalgae: A greener strategy towards sustainable biofuels production. *Science of the Total Environment*, 802, 149765.
- Rumsey, G. L., Hughes, S. G., Smith, R. R., Kinsella, J. E., & Shetty, K. J. (1991). Digestibility and energy values of intact, disrupted and extracts from dried yeast fed to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal Feed Science and Technology*, 33, 185-193.
- Sakarika, M., Ganigué, R., & Rabaey, K. (2022). Methylootrophs: from C1 compounds to food. *Current Opinion in Biotechnology*, 75, 102685.
- Sarker, P. K., Gamble, M. M., Kelson S., & Kapuscinski A. R. (2015). Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) show high digestibility of lipid and fatty acids from marine *Schizochytrium* sp. and of protein and essential amino acids from freshwater *Spirulina* sp. feed ingredients. *Aquaculture Nutrition*, 22(1), 109-119.
- Suman, G., Nupur, M., Anuradha, S., & Pradeep, B. (2015). Single cell protein production: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4(9), 251-262.
- Uwineza, C., Mahboubi, A., Atmowidjojo, A., Ramadhani, A., Wainaina, S., Millati, R., Wikandari, R., Niklasson, C., & Taherzadeh, M. J. (2021). Cultivation of edible filamentous fungus *Aspergillus oryzae* on volatile fatty acids derived from anaerobic digestion of food waste and cow manure. *Bioresource technology*, 337, 125410.
- Villarreal-Cavazos, D. A., Ricque-Marie, D., Nieto-López, M., Tapia-Salazar, M., Lemme, A., Gamboa-Delgado, J., & Cruz-Suárez, L. E. (2019). Apparent digestibility of amino acids in feedstuffs used in diets for the Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*. *Ciencias marinas*, 45(3), 91-100.
- Wang, S. K., Tian, Y. T., Dai, Y. R., Wang, D., Liu, K. C., & Cui, Y. H. (2022). Development of an alternative medium via completely replaces the medium components by mixed wastewater and crude glycerol for efficient production of docosahexaenoic acid by *Schizochytrium* sp. *Chemosphere*, 291, 132868.
- Wang, Y., Li, M., Filer, K., Xue, Y., Ai, Q., & Mai, K. (2017). Evaluation of *Schizochytrium* meal in microdiets of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) larvae. *Aquaculture Research*, 48(5), 2328-2336.
- Weyer, K. M., Bush, D. R., Darzins A., & Willson, B.D. (2010). Theoretical maximum algal oil production. *Bioenergy Research*, 3(2), 204-213.
- Wiebe, M. (2002). Myco-protein from *Fusarium venenatum*: a well-established product for human consumption. *Applied microbiology and biotechnology*, 58(4), 421-427.

NOTAS

- [1] PlantPills Wiki disponible en wiki.plantpills.co.uk
- [2] Los fotobiorreactores consisten en arreglos tubulares que permiten mantener a las microalgas expuestas a la luz mientras fluyen en un medio de cultivo. La versión de tanques exteriores también es una opción de cultivo y, aunque es más susceptible a la contaminación, genera mayores cantidades de biomasa.
- [3] Este microhongo se cultiva y procesa masivamente para manufacturar alimentos altos en proteína unicelular que se comercializan como veganos o análogos de carne.

CC BY-NC-ND