PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Microorganismos como Proteína Unicelular (SCP) para la Suplementación Pecuaria.

Monografía previa a la obtención del título de Licenciada en Microbiología

Paula Valentina Verdugo Espinosa

Quito, 2026

CERTIFICACIÓN

Certifico que la Monografía de Microbiología de la Srta. Paula Valentina Verdugo Espinosa ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MARTIN SEBASTIAN MARCIAL COBA

Dr. Martín Sebastián Marcial Coba

Quito, 12 de Junio de 2026

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por darme la fortaleza y la oportunidad de culminar mis estudios académicos; todos los pasos que he dado en mi vida son gracias a Él.

A mi mamá, Patricia Espinosa, por enseñarme a ser una mujer valiente y luchadora, y me ha brindado su amor incondicional en cada etapa de mi vida. Gracias a tu sacrificio y apoyo constante estoy logrando alcanzar cada uno de mis sueños a tu lado. Me faltaría vida para pagarte todo lo que haces por mí.

A mi novio, Alex, por enseñarme que el amor va más allá de la felicidad; es también aprender a enfrentar juntos los momentos difíciles con paciencia, comprensión y, sobre todo, con mucho amor. Gracias por ser parte de mi vida. Tu presencia es una motivación día a día.

A mi tutor, Martin Marcial, quien ha sido más que un profesor, un mentor y amigo que contagia la pasión por la Microbiología a cada uno de sus alumnos. Agradezco su apoyo y guía constante.

A mis amigos de carrera, quienes fueron mi salvavidas en esta etapa universitaria. Gracias por las risas, el apoyo mutuo y por hacer de estos años una de las experiencias más maravillosas de mi vida.

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN *1*

2. ABSTRACT *3*

3. INTRODUCCIÓN *5*

4. OBJETIVOS *9*

OBJETIVO GENERAL **9**

OBJETIVOS ESPECÍFICOS **9**

5. MARCO TEÓRICO *10*

5.1. Fundamentos de la Proteína Unicelular (SCP) *10*

5.1.2. Definición y Concepto de SCP **10**

5.1.3. Tipos de Microorganismos Productores de SCP **11**

- **Bacterias** **11**
- **Levaduras** **12**
- **Microalgas y cianobacterias** **13**
- **Hongos filamentosos** **14**

5.1.4. Criterios de selección de cepas **16**

5.2. Procesos de producción de proteína unicelular. *17*

5.2.1. Materias primas, sustratos y proceso de fermentación. **17**

5.2.2. Recuperación y procesamiento de la biomasa **21**

5.3. Valor nutricional y aplicación pecuaria *22*

5.4. Viabilidad y sostenibilidad del uso de SCP en la suplementación pecuaria *25*

5.4.1. Aspectos económicos **25**

5.4.2. Aspectos ambientales *26*

5.4.3. Regulaciones y seguridad alimentaria *28*

6. CONCLUSIONES *30*

7. RECOMENDACIONES *33*

8. REFERENCIAS *34*

9. ANEXOS *51*

9.1. METODOLOGÍA **51**

10. TABLAS *52*

1. RESUMEN

La creciente demanda mundial de proteínas de origen animal, junto con las limitaciones ambientales y económicas de las fuentes proteicas convencionales, ha generado la necesidad de buscar alternativas económicas y sostenibles para la suplementación pecuaria. En este contexto, la producción de proteína unicelular (Single Cell Protein, SCP), obtenida a partir de microorganismos como bacterias, levaduras, hongos filamentosos, microalgas y cianobacterias, surge como una opción prometedora para la nutrición animal.

Su potencial radica en su alto contenido proteico que puede superar el 60% de la biomasa seca dependiendo de la especie microbiana utilizada y sus condiciones de cultivo. Además, proporciona un perfil nutricional equilibrado rico en aminoácidos esenciales, vitaminas, compuestos bioactivos y minerales que pueden mejorar el crecimiento, la salud intestinal, la eficiencia alimenticia y la respuesta inmunitaria en varias especies pecuarias. Por otra parte, su rápido crecimiento microbiano y la capacidad de utilizar residuos agroindustriales de bajo costo como sustratos hacen que la proteína unicelular sea una fuente proteica eficiente y viable. En este estudio, se analizaron las principales especies microbianas utilizadas en la producción de SCP, sus procesos de fermentación y obtención de la biomasa, aplicaciones pecuarias, sostenibilidad ambiental, viabilidad económica y marcos regulatorios que avalan su uso en la suplementación pecuaria.

No obstante, a pesar de ser una alternativa viable para complementar o sustituir parcial o totalmente a fuentes proteicas convencionales, su adopción comercial aun enfrenta desafíos económicos y limitaciones biológicas relacionadas con la eliminación de ácidos nucleicos (ARN), el procesamiento de la biomasa, inocuidad del producto final y los costos de escalamiento industrial. Sin embargo, estos obstáculos pueden superarse mediante avances biotecnológicos y la optimización de

procesos productivos que permitan mejorar su competitividad comercial. De esta manera, la SCP se consolida como un pilar innovador para garantizar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de la industria pecuaria del futuro.

Palabras clave: Proteína unicelular (SCP), alimentación animal, suplementación pecuaria, fermentación, residuos agroindustriales, sostenibilidad.

2. ABSTRACT

The growing global demand for animal protein, coupled with the environmental and economic limitations of conventional protein sources, has created a need to find economical and sustainable alternatives for livestock supplementation. In this context, single cell protein (SCP) production, obtained from microorganisms such as bacteria, yeasts, filamentous fungi, microalgae, and cyanobacteria, has emerged as a promising option for animal nutrition.

Its potential lies in its high protein content, which can exceed 60% of the dry biomass depending on the microbial species used and its cultivation conditions. Furthermore, it provides a balanced nutritional profile rich in essential amino acids, vitamins, bioactive compounds, and minerals that can improve growth, gut health, feed efficiency, and immune response in various livestock species. Moreover, its rapid microbial growth and the ability to utilize low cost agro-industrial waste as substrates make single-cell protein an efficient and viable protein source. This study analyzed the main microbial species used in single-cell protein (SCP) production, their fermentation and biomass extraction processes, livestock applications, environmental sustainability, economic viability, and regulatory frameworks that support their use in livestock supplementation.

However, despite being a viable alternative to complement or partially or completely replace conventional protein sources, its commercial adoption still faces economic challenges and biological limitations related to nucleic acid (RNA) removal, biomass processing, final product safety, and industrial scaling costs. Nevertheless, these obstacles can be overcome through biotechnological advances and the optimization of production processes that improve its commercial competitiveness. In this way, SCP is consolidating itself as an innovative pillar for ensuring food security and the sustainability of the livestock industry of the future.

Keywords: Single-cell protein (SCP), animal feed, livestock supplementation, fermentation, agro-industrial waste, sustainability.

3. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los productos pecuarios son una fuente significativa de proteínas de alta calidad y nutrientes importantes para la dieta humana. Sin embargo, en los últimos años, la creciente demanda mundial de proteína animal se ha incrementado de manera sostenida debido al aumento poblacional. Al respecto, se estima que para 2050 la población alcanzará cerca de 9,7 billones, lo que exigiría duplicar la producción de proteínas animales para cubrir la demanda proyectada que habrá aumentado alrededor de un 20% (FAO, s. f.; Li et al., 2024). Consecuentemente, esto ha conducido a un crecimiento acelerado de la producción ganadera. En tal contexto, durante el año 2024 el mercado global de proteína animal alcanzó aproximadamente 22,18 mil millones de dólares y se proyecta que crecerá a una tasa anual compuesta de alrededor del 4,4% durante la próxima década, llegando a más de 34 mil millones de dólares en 2034 (Swar, 2025). Esta expansión de la producción pecuaria, consecuentemente, depende de múltiples fuentes nutricionales para la alimentación diaria animal.

La nutrición animal es actualmente un pilar fundamental para garantizar la seguridad alimentaria mundial, y en ese sentido las proteínas representan el macronutriente más importante en la alimentación pecuaria. En ese contexto, Cherian., (2019) menciona que las proteínas son fundamentales para la vida y constituyen los principales componentes estructurales de los tejidos animales como piel, músculos, lana, plumas, tendones y huevos. Además, participan en actividades bioquímicas, inmunológicas, de transporte y otras actividades reguladoras (Cherian, 2019). Por lo tanto, el aporte adecuado de proteínas y aminoácidos en la dieta diaria es fundamental para el crecimiento, la salud y el rendimiento de los animales de producción. No obstante, la dependencia de fuentes de proteínas convencionales como la harina de soja y la harina de pescado plantean serios desafíos crecientes de sostenibilidad ambiental, incluyendo la deforestación, la degradación de tierra, la competencia entre piensos y alimentos por los recursos, el aumento de costos y además las restricciones regulatorias han puesto en evidencia la crisis de abastecimiento de los alimentos

balanceados (Pexas et al., 2023). Por lo cual, es importante explorar las fuentes de proteínas para la alimentación animal en la cual se busque ingredientes alternativos viables para construir una industria sostenible.

Las fuentes no convencionales que podrían reemplazar parcial o totalmente a fuentes como la harina de soja o pescado dependen en gran medida del tipo de ganado que requiera especialmente suplementación proteica (Porto & Rodríguez-Forero, 2023). Por ejemplo, las aves de corral y cerdos se alimentan especialmente de semillas de leguminosas poco convencionales como guisantes, garbanzos, habas y altramuces, microalgas y primordialmente insectos ya que son una fuente prometedora y rica en proteínas (Massimiliano Lanza et al., 2025). En el caso de rumiantes, se ha optado por la suplementación mediante ensilaje de caña de azúcar, maíz y soja de planta entera, ya que mejora la disponibilidad de alimento en épocas críticas de producción (Massimiliano Lanza et al., 2025; Villa et al., n.d.). Asimismo, la supleción de forraje mixto de granos de triticale y altramuz, los cuales son recursos ricos en proteínas, efectivas especialmente en condiciones propensas a la sequía (Massimiliano Lanza et al., 2025). Por otra parte, entre las estrategias para reducir o reemplazar la dependencia de la harina de pescado (derivada de peces forrajeros), en la acuicultura se ha incrementado el uso de proteínas de macroalgas y microalgas (Philip Thornton et al., 2023).

Ante este panorama, resulta importante adoptar nuevas técnicas que ayuden a mejorar la productividad pecuaria junto con tecnologías e ingredientes innovadores que reduzcan el impacto ambiental y garanticen la seguridad alimentaria a largo plazo. Entre las alternativas desarrolladas se encuentran la carne cultivada, algas e insectos que exhiben un gran potencial para servir como alimento en el futuro (Li et al., 2024; Thornton et al., 2023). Asimismo, se ha propuesto el uso de Proteína Unicelular (SCP por sus siglas en inglés) para la suplementación animal. Esta tecnología se refiere al aprovechamiento de biomasa comestible de microorganismos unicelulares (Onyeaka et al., 2022). Esta puede incluir la biomasa entera o de

extractos proteicos de cultivos individuales o mixtos de diversos grupos microbianos, que incluye algas, bacterias, hongos filamentosos y levaduras que se han cultivado a gran escala (Ahmed et al., 2025; Onyeaka et al., 2022). Estos microorganismos se cultivan bajo condiciones fermentativas controladas que garantizan una adecuada tasa de crecimiento, aprovechando sustratos económicos compuestos enriquecidos con carbono, nitrógeno y fósforo para la producción de proteínas (Y. P. Li et al., 2024a). Además, pueden emplearse residuos y subproductos agroindustriales de bajo valor como sustratos, donde sus tasas de crecimiento son rápidas en condiciones óptimas; así como el despliegue de microorganismos modificados genéticamente y nuevos diseños de biorreactores, para mejorar los rendimientos de proteínas y reducir los costos de producción (Gundupalli et al., 2024; Y. P. Li et al., 2024a)

La SCP proporciona un equilibrio adecuado de vitaminas, minerales, carbohidratos, grasas, ácidos nucleicos y lípidos, lo que la hace versátil para diversas aplicaciones, desde la producción de alimentos y piensos (Chamodi et al., 2025a). Asimismo, aporta aminoácidos esenciales, como la lisina y la metionina, que suelen ser limitantes en diversos alimentos vegetales y animales. Por lo tanto, su inclusión puede mejorar la salud y calidad nutricional de los productos pecuarios (Y. P. Li et al., 2024a; Suman et al., 2015). Por esta razón, puede utilizarse como suplemento proteico en dietas humanas y animales. No obstante, ante el serio problema que representa la deficiencia de fuentes de proteína actualmente, la producción de proteína de origen unicelular (SCP) para consumo humano se produce a partir de un número limitado de especies microbianas (Raziq, 2020; Ritala et al., 2017). En cambio, la gama de fuentes de SCP utilizadas en la alimentación animal es más amplia y tiene mayor aceptabilidad dentro de la industria (Bratosin et al., 2021).

A pesar de las prometedoras perspectivas, la aplicación de la proteína unicelular (SCP) en la suplementación pecuaria enfrenta desafíos, ya que se utiliza predominantemente como aditivo

complementario para piensos en lugar de como fuentes primarias de proteínas (Chamodi et al., 2025). El principal obstáculo para su utilización en el sector alimentario radica en el elevado costo de producción, derivado de la necesidad de biorreactores avanzados, entornos estériles y procesos posteriores con alta demanda energética (Onyeaka et al., 2022). Además, se suman limitaciones como el bajo rendimiento de producción, ya que, a pesar de las rápidas tasas de crecimiento de los microorganismos, el rendimiento de biomasa obtenida por unidad de sustrato a menudo resulta inadecuado para sustituir comercialmente a las fuentes proteicas convencionales (Chamodi et al., 2025a). Asimismo, se exigen protocolos sólidos de seguimiento y ensayo que aseguren el cumplimiento de las normas de seguridad, garantizando que la SCP no represente riesgos ni para los animales que los consumen ni para los consumidores de productos animales (Li et al., 2024). Para garantizar la viabilidad futura de la SCP, sus perspectivas de investigación y desarrollo se centran en la optimización, y reducción de costos. Según Ugbogu & Ugbogu., (2016), esto se lograría mediante avances clave como la modificación genética de los microorganismos para producir aminoácidos específicos de interés, la optimización de procesos hacia abajo (*down-stream*) y la mejora de la fermentación (*fed-batch*), además de la aplicación de pruebas toxicológicas eficientes para garantizar la seguridad y mejorar la aceptabilidad por parte del consumidor

Por ello, la presente propuesta de investigación pretende generar una visión panorámica del estado del arte de la producción de proteína unicelular (SCP) en la suplementación pecuaria, considerando que esta representa una opción prometedora para enfrentar desafíos de seguridad alimentaria, sostenibilidad ambiental y resiliencia económica en la producción animal, tanto a nivel global como en Ecuador, donde la producción pecuaria es un pilar económico clave.

4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

1. Analizar el potencial de los microorganismos como fuente de Proteína Unicelular (SCP) para la nutrición animal.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar las principales especies de microorganismos utilizados en la producción de proteína unicelular (SCP) para la suplementación animal.
2. Evaluar la composición nutricional de la proteína unicelular, proveniente de distintas cepas microbianas y diferentes procesos de producción, para consumo de diferentes especies pecuarias.
3. Determinar la factibilidad económica, sostenibilidad y el impacto ambiental del uso de SCP para la suplementación pecuaria.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Fundamentos de la Proteína Unicelular (SCP)

5.1.2. Definición y Concepto de SCP

La población mundial se encuentra en constante crecimiento; como consecuencia la demanda mundial de proteínas de origen animal alcanzaría hasta 1 250 millones de toneladas anuales (Bratosin et al., 2021). Esto representa un problema importante para la humanidad, ya que, a pesar de los esfuerzos no se ha conseguido complementar la alimentación humana y animal con fuentes de proteínas convencionales (Suman et al., 2015). En este contexto, se propone el uso de proteína unicelular (Single Cell Protein) como una alternativa viable para la suplementación en alimentación animal. La SCP es una biomasa comestible seca rica en proteínas, que es extraída de cultivos de algas, levaduras, hongos filamentosos o bacterias y actualmente se utiliza como sustituto de fuentes convencionales de proteínas (Kelechi M. Ukaegbu-Obi, 2016).

La proteína unicelular contiene un amplio espectro de aminoácidos, tanto esenciales, representados por lisina, metionina, valina y triptófano, como no esenciales, incluyendo ácido aspártico, glicina, cistina y ácido glutámico; bajo contenido de grasa y una relación proteína: carbohidrato más alta que en forrajes (Gundupalli et al., 2024; Raziq, 2020). Además, incluye vitaminas como la tiamina, riboflavina, piridoxina, ácido nicotínico, ácido pantoténico, ácido fólico, biotina, cianocobalamina, ácido ascórbico, β-caroteno y α-tocoferol; minerales, ácidos nucleicos y lípidos (Bratosin et al., 2021).

Para la producción de SCP, los microorganismos utilizados se cultivan bajo condiciones controladas para incrementar su rendimiento y contenido nutricional. Por una parte, los microorganismos producen SCP utilizando sustratos convencionales como melaza, residuos de frutas y verduras; ricos en carbohidratos, y que se consideran sustratos microbianos naturales y constituyen una materia prima renovable (Suman et al., 2015). Por otro lado, la biomasa obtenida con base en sustratos no

convencionales explora la utilización de materias primas no alimentarias como los residuos agrícolas, subproductos del petróleo, etanol, gas natural, biomasa lignocelulósica y glicerol y metanol de la industria de biodiésel que produce biomasa rica en proteínas (Li et al., 2024; Raziq, 2020).

Con base en estos antecedentes, la SCP se diferencia de otras fuentes de proteína debido a su versatilidad de aplicaciones, especialmente en la producción de alimentos, piensos o como suplementos dietéticos (Y. P. Li et al., 2024a). Además, resalta por sus ventajas significativas al no requerir tierras cultivables, condiciones climáticas específicas ni un exceso de agua dulce. Asimismo, utiliza una variedad de sustratos de fermentación de bajo costo y alto rendimiento que permiten un rápido crecimiento de las células microbianas. (Abedfar et al., 2025).

5.1.3. Tipos de Microorganismos Productores de SCP

- **Bacterias**

Por su alto valor nutricional la SCP bacteriana constituye una opción prometedora para la nutrición animal, reemplazando parcial o totalmente fuentes convencionales como la soja y otros cultivos proteaginosos (Pexas et al., 2023). Esta fuente alternativa puede contener entre un 50% y un 80% de proteína (peso seco) y el contenido de aminoácidos, vitaminas, y fosfolípidos es superior o similar a las recomendaciones de la FAO (Gundupalli et al., 2024). Estos microorganismos se caracterizan por su tamaño celular reducido, adaptabilidad, menores exigencias de crecimiento y principalmente por su tiempo de generación que oscila entre 20 a 120 min (Abedfar et al., 2025). Las bacterias se suelen cultivar en una amplia gama de sustratos, como mono-, di- y polisacáridos (ej: almidones), desechos orgánicos y petroquímicos (ej: metanol y etanol), e incluso recursos hídricos con alto contenido de nutrientes y minerales (Vethathirri et al., 2021).

Entre los taxones más relevantes, por su contenido proteico, destacan bacterias metanotróficas de la familia *Methylococcaceae* (Ej: *Methylococcus capsulatus*), así como especies de los géneros *Bacillus* (Ej: *B. subtilis*), *Methylovorus menthalis*, *Streptomyces, Aurantiochytrium* y *Brevibacterium* **(Tabla 1.)** (Forero-Ararat et al., 2021). Asimismo, estudios recientes revelaron que especies de bacterias

fototróficas púrpuras como *Rhodospirillum* spp., *Rhodobacter* spp. y *Rhodopseudomonas* spp. son candidatas prometedoras para la producción de SCP (Capson-Tojo et al., 2020). Esto se debe a que cumplen criterios clave como una alta tasa de crecimiento, tolerancia al pH y el control de condiciones durante la fermentación. Sin embargo, su principal desventaja se basa en su abundante contenido de ácidos nucleicos (aproximadamente 20%), especialmente ARN, que en los productos alimenticios son indeseables y pueden provocar problemas de salud como cálculos renales, por lo que se requiere de procesos de eliminación adicionales que aumentan los costos de producción (Alves et al., 2025; Jones et al., 2020).

- **Levaduras**

Las levaduras, ricas en aminoácidos, vitaminas del complejo B y lisina, se utilizan ampliamente en la alimentación animal y están disponibles en diversas formas, como levadura viva, paredes celulares, componentes purificados y productos fermentados (Alves et al., 2025). Sin embargo, su bajo contenido de metionina y cisteína limita su eficacia como única fuente de proteína (Sharif et al., 2021). Por ello, se ha desarrollado el uso de levaduras para la producción a gran escala de SCP, involucrando a los géneros más estudiados como *Saccharomyces* (Ej: *Saccharomyces cerevisiae*), *Torulopsis* y *Candida* (Ej: *Candida utilis FMJ12, Candida tropicalis*) **(Tabla 2)** (Pablo & Bellido -1 -, 2017). Estos se caracterizan por sus células ricas en aminoácidos, incluyendo lisina, metionina y treonina, además de vitaminas del complejo B, carbohidratos de pared celular como β-glucanos, manano, lípidos y minerales (Chamodi et al., 2025). Esta fuente suele contener alrededor del 40% y 55% de biomasa seca, siendo esencial para el desarrollo y crecimiento animal (Mahdy et al., 2022). Adicionalmente, algunas cepas de *Saccharomyces cerevisiae* y *Debaryomyces hansenii*, presentan propiedades probióticas, lo que podría añadir valor funcional a la proteína unicelular derivada de ellas (Alves et al., 2025). Las células de levadura tienen la capacidad de utilizar sustratos de bajo costo ricos en carbono y diversas fuentes de nitrógeno, incluyendo ácidos grasos libres sólidos o líquidos, triacilgliceroles, glicerol, urea, nitratos, amoníaco, sales de amonio y otros compuestos orgánicos nitrogenados, lo que permite optimizar el

rendimiento proteico (Dunuweera et al., 2021; Koukoumaki et al., 2024a). En la actualidad, la SCP de levaduras se utiliza con frecuencia en piensos animales como suplemento alimentario y probiótico (Onyeaka et al., 2022). Un reciente estudio demostró que la levadura de cerveza *Saccharomyces cerevisiae* es una alternativa potencial a la harina de pescado en las dietas del langostino de río (*Macrobrachium rosenbergii*) criados en sistemas de biofloc o de acuicultura de recirculación (Chamodi et al., 2025). A pesar de que las levaduras presentan una baja tasa de crecimiento en comparación con otros microorganismos, se han desarrollado estrategias para optimizar su crecimiento, entre ellas se incluye la selección cuidadosa de cepas de levadura, y de sustratos adecuados, consideración de los subproductos generados durante la producción de biomasa de células enteras y el perfeccionamiento de las técnicas de procesamiento de biomasa para obtener un prototipo final práctico (Sekoai et al., 2024). Sin embargo, su alto contenido de ácidos nucleicos (6–10%) puede limitar su aplicación ,ya que, pueden elevar el ácido úrico tanto en humanos como en animales (Koukoumaki et al., 2024). Además, la baja digestibilidad de su pared celular constituye un desventaja adicional del uso de SCP de levaduras a gran escala (Chamodi et al., 2025a).

- **Microalgas y cianobacterias**

Se ha considerado el uso de microalgas, como una alternativa de proteína suplementaria, debido a que su biomasa es rica en contenido proteico, minerales, vitaminas y lípidos beneficiosos (Raziq, 2020). Estos microorganismos contienen aproximadamente entre un 30% y 80% de proteína cruda, superando el contenido proteico de alimentos tradicionales como la harina de soja, el pollo, el pescado y los cacahuates (Alves et al., 2025). Diversos estudios han comprobado que géneros como *Chlorella* (Ej: *Chlorella pyrenoidosa*), *Coelastrum*, *Scenedesmus* (Ej: *Scenedesmus almeriensis*) y *Spirulina* (Ej: *Spirulina platensis*) **(Tabla 3)** poseen un alto contenido proteico y lipídico, destacando la presencia de ácidos grasos omega-3 (ácido eicosapentaenoico) (Jones et al., 2020). Asimismo, son una fuente rica en sales minerales, vitaminas y pigmentos fotosintéticos, entre los que se incluyen la clorofila y diversos carotenoides como el β-caroteno, luteína, astaxantina, fucoxantina, violaxantina y zeaxantina

(Safafar et al., 2016). Además, presentan una fuerte actividad antioxidante, mediante un sistema enzimático que elimina radicales libres (Sharif et al., 2021). Por ello, una dieta enriquecida con microalgas, especialmente con *Spirulina maxima* puede ayudar a proteger las células madre y progenitoras, gracias a sus propiedades bioactivas (Suman et al., 2015). No obstante, uno de los principales desafíos radica en la digestibilidad de microalgas y cianobacterias, ya que algunas poseen paredes celulares rígidas, lo que dificulta su ruptura y, por ende, el acceso y la extracción eficiente de proteínas (Li et al., 2024). En dietas de rumiantes, este factor puede limitar su inclusión en altos niveles, debido a la reducción en la digestibilidad y el aprovechamiento de nutrientes. Para solventarlo, se ha demostrado que la trituración mecánica de las células de algas con un molino de perlas aumenta la digestibilidad (Kholif & Olafadehan, 2021). Así, se sugiere que las especies de *Dunaliella* spp. resultan más ventajosas como materia prima proteica, ya que carecen por completo de pared celular (Janssen et al., 2022). Por otra parte, su contenido de ácidos nucleicos se encuentra en bajas concentraciones (aprox. 6%) (Koukoumaki et al., 2024). Estudios recientes han reportado concentraciones inferiores al 2% en géneros como *Chlorella* y *Arthrospira*, mientras que otros estudios indican valores entre el 5% y el 6% en especies de algas similares (Janssen et al., 2022). Por esta razón, se ha optado el uso de microalgas como una opción alimentaria más segura en comparación con hongos y bacterias (Salazar-López et al., 2022). No obstante, el consumo excesivo superior al 2% puede provocar acumulación de metabolitos nitrogenados provocando efectos negativos en la salud de los animales (Abakoura Barka & Christophe Blecker, 2016). Por ello, es importante el monitoreo constante durante el proceso de obtención de SCP para evitar un problema de seguridad en la alimentación animal.

- **Hongos filamentosos**

Actualmente, los hongos son los organismos más estudiados para la producción de SCP. Esto se debe a su facilidad de crecimiento, gran tamaño celular (5 – 10 µm) y su baja actividad hídrica que permite una recuperación de biomasa más sencilla durante la cosecha (Onyeaka et al., 2022). Además, su contenido en proteína cruda varía ampliamente, pero puede ser de hasta el 45%-55% junto con

vitaminas, como riboflavina, niacina, tiamina, biotina, ácido pantoténico, colina, piridoxina, glutatión, ácido p-aminobenzoico, estreptogenina y ácido fólico y lípidos esenciales (Pablo & Bellido -1 -, 2017). Los hongos que cumplen con las características viables para producir SCP se distribuyen en los géneros *Penicillium, Rhizopus*, *Fusarium* (Ej. *Fusarium venenatum*)*, Mucor* y *Aspergillus* (Ej: *Aspergillus niger*) **(Tabla 4)** (Ahmed et al., 2025; Uwineza et al., 2024). Muchos de estos tienen la capacidad de crecer en ambientes con un amplio rango de pH (1,5–8,0). Además, producen enzimas hidrolíticas como celulasas, amilasas, proteasas y lipasas, lo que les permite hidrolizar y metabolizar diversos sustratos, incluidos subproductos agroindustriales como suero, pulpa de naranja y cáscaras de frutas suplementadas con nutrientes como amonio y urea (Alves et al., 2025). Las características mencionadas confieren a los hongos filamentosos la capacidad única de descomponer carbohidratos, proteínas y lípidos de diversos sustratos para utilizarlos como fuentes de nutrientes. Recientes estudios de Uwineza et al. (2024) mencionan que *A. oryzae*, es el hongo filamentoso comestible más estudiado para su inclusión en la alimentación de rumiantes, ya que su maquinaria enzimática permite secretar diferentes enzimas como alfa-amilasa, beta-amilasa, proteasas y celulasas (L. Liu et al., 2014). De esta manera, logra descomponer y consumir varios sustratos por fermentación en estado sólido (SSF) como sumergido (SM) para producir biomasa fúngica con un alto contenido de proteína. Por otra parte, *Fusarium venenatum* en la actualidad es ampliamente utilizado por su elevada capacidad de fermentar carbohidratos y la generación de una biomasa rica en proteínas (45 % de la masa) de alta calidad (Dalbanjan et al., 2024; Upcraft et al., 2021), cuyo contenido de aminoácidos esenciales alcanza el 44 % de la proteína total (Upcraft et al., 2021). Además, presenta menor densidad energética que productos cárnicos equivalentes, debido a que carece de grasas de origen animal y colesterol (Seyed Reihani & Khosravi-Darani, 2018). El medio más utilizado para la producción de biomasa por *F. venenatum* es el medio Vogel con glucosa como fuente de carbono (Seyed Reihani & Khosravi-Darani, 2018). Adicionalmente, se han añadido diversos sustratos económicos, como residuos agrícolas, como fuentes de carbono y energía para la producción de micoproteínas (ej. almidón de trigo, patatas, yuca,

arroz o jugo de caña) (Hosseini & Khosravi-Darani, 2011). En cuanto a su viabilidad, diversas investigaciones demostraron que la cepa de *F. venenatum* ATCC PTA-2684 se consideró segura, ya que no producía metabolitos microbianos tóxicos y *F. venenatum A3/5* fue aprobado para su comercialización como alimento en 1984 por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Reino Unido (Majumder et al., 2023).

Sin embargo, para la producción a gran escala se deben abordar desafíos como su contenido relativamente alto de ácidos nucleicos (7-10%) en comparación con las algas y la baja digestibilidad de la pared celular (Chamodi et al., 2025b; Sharif et al., 2021). No obstante, estudios hicieron evidente que la micoproteína podía consumirse sin dañar a modelos murinos cuando el contenido de ácido nucleico de las células se reducía a niveles seguros (Majumder et al., 2023). Por otra parte, algunas cepas de mohos como *A. fumigatus, Fusarium graminearum* y *Aspergillus niger* son peligrosas para animales y humanos, por la producción de micotoxinas que pueden provocar un daño a la salud (Raziq, 2020).

5.1.4. Criterios de selección de cepas

Las cepas microbianas constituyen un pilar fundamental en la producción de SCP, considerando aspectos clave como una elevada tasa de crecimiento, un contenido nutricional óptimo donde se tenga en cuenta el valor energético, contenido proteico y el equilibrio de aminoácidos esenciales. Asimismo, se deben considerar criterios técnicos como el tipo de cultivo y tipo de separación (Bajpai, 2017; Berzina et al., 2024). Los microorganismos seleccionados deben ser inocuos y, por lo tanto, deben poseer el estatus GRAS (Generalmente Reconocidos como Seguros) o QPS (Presunción Cualificada de Seguridad) para los procesos de fermentación, facilitando su uso comercial (Lübeck & Lübeck, 2022). Un claro ejemplo es el uso de especies de microalgas como *Arthrospira* spp., *Chlorella* spp., *Dunaliella* spp., *Haematococcus* spp. y *Schizochytrium* spp. que se encuentran clasificadas como GRAS por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA). Sin embargo, su aplicación en alimentos y piensos en formulaciones comerciales requiere una especial atención debido a su

posible toxicidad (Abedfar et al., 2025). La presencia de cepas productoras de toxinas o el uso de microalgas provenientes de cultivos en aguas residuales tóxicas podría dar lugar a la formulación de suplementos dietéticos contaminados y, por lo tanto, peligrosos (Koukoumaki et al., 2024). Por otra parte, los microorganismos deben presentar un bajo porcentaje de ácidos nucleicos. Esta característica representa una problemática, especialmente para las bacterias, debido a su alto contenido de ácidos nucleicos, que puede alcanzar hasta el 20% (Alves et al., 2025). Por este motivo, se ha evaluado la reducción de los ácidos nucleicos con tratamientos enzimáticos, térmicos o la adición de sales, ácidos o hidróxidos (Janssen et al., 2022). Además, su contenido proteico debe oscilar entre el 50% y 70% para microalgas, bacterias, hongos filamentosos y levaduras. Sin embargo, estos porcentajes pueden variar según el sustrato utilizado en cada caso, incluso en condiciones óptimas de crecimiento (Mohamed Al-Farsi et al., 2019; Pablo & Bellido -1 -, 2017; Salazar-López et al., 2022). Asimismo, es necesario que los microorganismos sean de rápido crecimiento para obtener una producción masiva. Sin embargo, una alta producción genera mayores cantidades de ARN en la célula (Sharif et al., 2021).

5.2. Procesos de producción de proteína unicelular.

5.2.1. Materias primas, sustratos y proceso de fermentación.

La proteína unicelular requiere la utilización de materias primas abundantes de bajo costo, no tóxicas, renovables y capaces de promover el crecimiento microbiano para biomasa de alta calidad (Alves et al., 2025). Tradicionalmente, su producción se basa en la fermentación microbiana de materias primas a base de azúcares tales como la melaza, jarabe de maíz y almidón hidrolizado (Gao et al., 2026). Sin embargo, se ha propuesto la producción a partir de residuos agrícolas e industriales que incluyen fuentes ricas en mono y disacáridos (ej. residuos lácteos), almidón (ej. granos), polisacáridos estructurales (ej. subproductos lignocelulósicos), fuentes ricas en proteínas o lípidos (ej. derivados de la producción de alimento para peces y residuos de mataderos), y recursos a base de glicerol. (Koukoumaki et al., 2024). En este sentido, los residuos agrícolas se han reconocido como

materias primas de valor potencial, ya que poseen nutrientes equilibrados para el cultivo de microorganismos; poseen un contenido de humedad del 74-90%, una relación sólidos volátiles/sólidos totales (SV/ST) del 80-97% y una relación carbono/nitrógeno (C/N) de 14,7-36,4 (Sekoai et al., 2024). Ejemplos comunes incluyen el orujo de manzana, pulpa de cítricos, cáscaras de ñame, residuos de piña, cáscaras de patata y residuos de papaya (Molnár et al., 2022). Sin embargo, se requiere un porcentaje de fuentes de nitrógeno adicionales para la síntesis de proteínas para mantener el crecimiento microbiano. Las fuentes comunes de nitrógeno utilizadas en la producción de SCP incluyen urea, sales de amonio, nitrato, así como nitrógeno orgánico que se encuentra en diferentes productos de desecho (Zhang et al., 2024). De esta manera, es fundamental utilizar el sustrato adecuado, ya que influye directamente en el resultado de la fermentación. Cada técnica de fermentación debe optimizarse, puesto que los organismos reaccionan de forma diferente a cada sustrato y, por lo tanto, la tasa de utilización de nutrientes varía en cada uno (Reihani & Khosravi-Darani, 2019).

La producción de SCP se realiza mediante varios procesos de fermentación, en los cuales los azúcares se catabolizan a través de la glucólisis u otras vías metabólicas para producir energía y moléculas precursoras para la biosíntesis de proteínas (Gao et al., 2026). Los factores clave que influyen en la fermentación incluyen el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto, el CO_2, la composición del sustrato y el modo de operación del reactor (Alves et al., 2025). Estos parámetros determinan el rendimiento del producto final, las propiedades sensoriales, el valor nutricional y la producción de toxinas. Por las condiciones de cultivo y del sustrato, los principales procesos se clasifican en:

- **Fermentación sumergida**

La fermentación sumergida implica el crecimiento de microorganismos en medios líquidos que contienen fuentes de carbono y nitrógeno, así como micronutrientes, donde el suministro de oxígeno se refuerza con agitación constante (Bakratsas et al., 2023). La fermentación se lleva a cabo en biorreactores que funcionan en modo discontinuo, semicontinuo o continuo con condiciones óptimas de pH, temperatura, aireación y fermentación. Posteriormente se obtiene la biomasa microbiana

mediante centrifugación o filtración, seguido del secado (Sekoai et al., 2024). Actualmente, este proceso se ha convertido en una opción biotecnológica atractiva para el tratamiento de residuos, ya que genera proteína unicelular fúngica a partir de subproductos de la industria alimentaria como el suero de queso y la melaza de naranja (Ibarruri & Hernández, 2019). Generalmente, este tipo de fermentación se enfoca en hongos filamentosos, especialmente de los géneros *Penicillium* y *Aspergillus,* debido a que alcanzan tasas de crecimiento y productividades de biomasa suficientemente altas (Gibbs et al., 2000). En este contexto, un estudio reciente de Koukoumaki et al., (2024) reveló que *A. niger* a partir de cáscara de plátano mediante fermentación en matraz agitado sumergido obtuvo una producción máxima de biomasa y PSA alcanzando 24,7 g/L y 61,2 % p/p, respectivamente, lo que evidencia un alto potencial de viabilidad para la producción de una biomasa rica en proteínas a partir de residuos agroindustriales.

- **Fermentación semisólida**

La fermentación semisólida es una variante de la fermentación en estado sólido, en esta el sustrato se utiliza principalmente en estado sólido insoluble el cual funciona como una matriz sólida porosa que absorbe agua con una actividad de agua relativamente alta y contiene carbohidratos disponibles, nutrientes minerales y fuentes de nitrógeno (Bajpai, 2017). Durante el cultivo, se cumplen operaciones como la agitación y mezcla de sistema multifásico, transporte de oxígeno y eliminación de calor al entorno, por lo cual es fundamental optimizar la preparación del medio para la producción de SCP; esto incluye la selección de un medio adecuado y una fuente de carbono, la prevención de contaminación del medio y el aislamiento del producto final (Raziq, 2020). Para este fin se utilizan diferentes tipos de fuentes de carbono, entre las que se incluyen hidrocarburos gaseosos, n-alquenos, etanol, metanol, óxido de carbono, polisacáridos, melaza, efluentes de diversas cervecerías y otros compuestos sólidos (Sharif et al., 2021). La principal ventaja de esta fermentación es que ofrece una eliminación de calor metabólica moderada facilitada por su fase líquida ligeramente más alta en relación con la fermentación en estado sólido; sin embargo, presenta un menor rendimiento de

proteínas en comparación con la fermentación sumergida (Li et al., 2024). A pesar de esto, la fermentación semisólida destaca por su versatilidad en el aprovechamiento de residuos agroindustriales, como se indica en el estudio de Oliveira et al., (2018) donde al cultivar *Aspergillus fumigatus* en condiciones óptimas de operación logró alcanzar una proteína fúngica total de 0,32 mg/mL utilizando bagazo de caña.

- **Fermentación en estado sólido**

La fermentación en estado sólido es un proceso que se lleva a cabo en condiciones de ausencia o casi ausencia de agua libre con un flujo continuo de aire, no obstante, el sustrato debe contener suficiente agua para mantener el metabolismo y el crecimiento de los microorganismos (Zhang et al., 2024). En este sistema, la mayoría de microorganismos logran obtener las condiciones suficientes para su crecimiento y actividades metabólicas con el mínimo o ningún exceso de agua en el sustrato sólido húmedo. Sin embargo, esto limita el desarrollo de ciertos microorganismos adaptados a bajas actividades de agua, como las levaduras y ciertos hongos filamentosos que presentan un crecimiento óptimo en sustratos sólidos puros con ~60%-65% de contenido de humedad (Y. P. Li et al., 2024a). La proteína producida mediante esta fermentación generalmente utiliza sustratos provenientes de subproductos de la industria alimentaria, como el bagazo, las cáscaras de frutas y verduras, la paja, la cáscara y el salvado de cereales, y se lleva a cabo mediante diferentes tipos de reactores, como reactores de lecho fijo, tambores giratorios, reactores de bandeja y configuraciones de flujo pistón (Perwez & Al Asheh, 2025). Gracias a este proceso, se logra obtener subproductos como ácidos orgánicos, enzimas, compuestos aromáticos, oligosacáridos de frutas, así como agentes bioactivos como el ácido giberélico y antibióticos (Rompato & Somoza, 2015). Recientes estudios demuestran la eficacia de este método utilizando la cepa fúngica *Aspergillus flavus* NRRL 21882 para obtener proteína unicelular a partir de desechos de cáscaras de arveja, papa y banano, donde se alcanzaron niveles de proteína cruda de hasta un 60,67% (A. R. Khan et al., 2024). Es por ello que, esta fermentación ha

ganado gran atención mundial debido a sus beneficios ya que utiliza poca energía y agua, produce poca agua residual y contribuye a la remediación ambiental (Sekoai et al., 2024).

5.2.2. Recuperación y procesamiento de la biomasa

Los diversos microorganismos requieren diferentes métodos para su recuperación de biomasa (cosecha microbiana). Por una parte, las bacterias pueden recuperarse por centrifugación, mientras que los hongos filamentosos se separan por filtración después del proceso de fermentación. En el caso de las microalgas, especies como *Spirulina* y *Coclastrium* que contienen baja biomasa microalgal se pueden recolectar por filtración con telas o mallas antes de realizar la centrifugación (Forero-Ararat et al., 2021; Ugbogu & Ugbogu, 2016).

Una etapa crítica del procesamiento es la eliminación de los factores antinutricionales, específicamente los ácidos nucleicos. Estos pueden eliminarse mediante diferentes métodos de purificación, que incluyen tratamientos químicos como concentrados de urea y la utilización de hidróxido de sodio, donde el ADN en contacto con el hidróxido de sodio (0,25 N) a 65 °C durante 1 hora, seguida de una neutralización y ebullición durante 10 minutos logra hidrolizar el ARN (Lemire et al., 2016). También se destacan tratamientos físicos (choque térmico) y métodos enzimáticos (endonucleasa de *Staphylococcus aureus*) (Alves et al., 2025). En este sentido, se han reportado varios tratamientos para disminuir la concentración de ácido nucleico de *S. cerevisiae* producida al cultivarse en cáscaras de papa, en el cual se aplicó un tratamiento de choque térmico de 70 °C durante 80 s, el uso de una base (NaOH, 1 N), un ácido (HCl, 2 %) y una sal (NaCl, 2 %) logró la reducción de ácidos nucleicos en un 43 %, 36 %, 20 % y 17 %, respectivamente (Salazar-López et al., 2022). A pesar de la factibilidad de estos métodos, es necesario examinar las implicaciones económicas de este proceso posterior (Sekoai et al., 2024). Adicionalmente, en algunos microorganismos es necesario aplicar procesos de degradación de la pared celular, ya que no se considera digerible para animales y aves con estómagos simples (Sharif et al., 2021). Se emplean técnicas como la ruptura mecánica, la hidrólisis

enzimática, el tratamiento ácido, el tratamiento alcalino y los líquidos iónicos, donde se usan bases, ácidos, disolventes, tensioactivos, sales, antibióticos, agentes quelantes, detergentes y agentes oxidantes para descomponerla, mejorando así la accesibilidad de los nutrientes y el rendimiento general (Chamodi et al., 2025a; Timira et al., 2022). Posteriormente, se realiza el aislamiento de proteínas; esta etapa consiste en la separación de proteínas en extractos que comparten características físicas similares, como dispersibilidad, densidad o tamaño. Este paso es fundamental para los procesos de purificación en los que se puede obtener proteínas individuales con una pureza del 90% al 98% (Amorim et al., 2021). Por último, la biomasa obtenida es secada en hornos industriales y molida para reducir los sustratos a polvo y finalmente ser comercializada (Forero-Ararat et al., 2021; Gao et al., 2026).

5.3. Valor nutricional y aplicación pecuaria

En la actualidad, la proteína unicelular representa una alternativa prometedora y sostenible para la alimentación animal debido a su contenido de proteínas, ácidos grasos, metabolitos biogénicos de alto valor y aminoácidos esenciales, los cuales aportan a la mejora de la respuesta inmunitaria y modulación de la microbiota intestinal (Cheng & Kim, 2022a; Marchi et al., 2023). El principal valor de la biomasa microbiana es su elevado contenido proteico que oscila entre el 60% y el 82%; por ello, la proteína bacteriana presenta una composición nutricional similar a la harina de pescado, mientras que la biomasa de levadura mantiene similitudes con la harina de soya (Forero-Ararat et al., 2021; Mohamed Al-Farsi et al., 2019). Asimismo, la proteína unicelular proveniente principalmente de levaduras y bacterias contiene aminoácidos esenciales, incluyendo la lisina, metionina, cisteína, treonina y triptófano que suelen ser deficientes en la mayoría de las harinas vegetales y animales (Ahmed et al., 2025; Bajpai, 2017; Dunuweera et al., 2021). Un ejemplo de ello es el estudio Páez et al., (2008) quienes evaluaron el perfil de aminoácidos de la proteína unicelular de *Kluyveromyces marxianus var. marxianus* ATCC 8554 cultivada en suero de leche; los resultados demostraron que el

contenido de lisina (5,47 ±3,0%) y de treonina (15,21 ±2,6%) fue superior a los encontrados en la harina de trigo, demostrando una distribución de aminoácidos equilibrada en comparación con los patrones de referencia establecidos por la FAO. Además, se ha informado que la SCP de bacterias y microalgas son fuentes ricas en vitamina B12, vitamina A, riboflavina, tiamina, colina, ácido fólico, niacina, piridoxina, ácido pantoténico, ácido para-aminobenzoico, inositol y biotina (Sharif et al., 2021).

Por otro lado, la digestibilidad de las proteínas es un factor importante en la alimentación animal. Las proteínas vegetales son limitantes debido a una menor digestibilidad por la presencia de factores antinutricionales (FAN), como fitatos, taninos, inhibidores de tripsina y lectinas (Grdeń & Sołowiej, 2022). Por ejemplo, la harina de soja contiene glicina, el inhibidor de la tripsina y los oligosacáridos que producen flatulencia, los cuales reducen la digestibilidad de los nutrientes en las dietas para cerdos (Cheng & Kim, 2022b). En contraste, la digestibilidad de la SCP, y de la mayoría de sus componentes, oscila entre el 65% y el 95 %, lo que posiciona a los microorganismos como una alternativa eficiente para la producción a gran escala ante la escasez y baja digestibilidad de las fuentes convencionales (Bajpai, 2017). No obstante, antes de su uso como alimento para animales, es necesario examinarlos para detectar efectos tóxicos, teratogénicos y mutagénicos (Schulz & Oslage, 1976).

Además de su valor nutricional, la SCP de bacterias, hongos, levaduras, microalgas y cianobacterias tiene efectos positivos en la salud intestinal al promover el crecimiento de bacterias beneficiosas y aumentar la diversidad del microbioma (Chamodi et al., 2025a). Diversas investigaciones han evaluado el desempeño de la proteína unicelular en distintas especies pecuarias. En el estudio de Sirakov et al., (2012) se demostró que la inclusión de un 10% de *Spirulina* en la dieta de truchas arcoíris incrementó significativamente la longitud corporal, el peso final, la ganancia diaria de peso y la tasa específica de crecimiento. De igual manera, Farstad, (1977) evaluó en aves, la suplementación en cantidades iguales con proteína de harina de soja y Pruteen, una proteína obtenida de *Pseudomonas*

methylotropha, donde se evidenció un aumento de peso final y la eficiencia alimenticia en comparación con las aves que recibieron concentraciones normales de harina de soja. En el caso de las levaduras, *Saccharomyces cerevisiae* ha demostrado ser un microorganismo beneficioso en la salud, el crecimiento y la productividad de rumiantes, cerdos y pollos, ya que, su inclusión en la dieta diaria mejoró la calidad de la sangre y sus rasgos productivos (Ogbuewu et al., 2019). Por otra parte, M. Y. Khan et al., 2011 determinaron los efectos positivos de una dieta que contenía proteína unicelular de *Penicillium expansum* al 10% de masa seca, mezclada con la dieta basal, donde se observó en pollos un efecto promotor sobre el crecimiento, aumento de peso, y baja mortalidad.

Por otra parte, el incremento de interés de la SCP para uso comercial ha dado lugar a productos como FeedKind, una harina proteica de bacterias metanótrofas obtenida de *Methylococcus capsulatus* junto con *Aneurinibacillus danicus*, *Brevibacillus agri* y *Cupriavidus cauae* cultivadas en gas metano mediante fermentación aeróbica (Longshaw et al., 2025). Este producto contiene alrededor del 70% de proteína, 8% de lípidos crudos y un perfil equilibrado de aminoácidos esenciales y no esenciales (R. Liu et al., 2023). Así, se ha consolidado como una fuente proteica adecuada para peces, camarones y otros animales monogástricos, sin restricciones para su uso en la alimentación de animales de granja dentro de la Unión Europea (Yu et al., 2023). Otro producto de interés es Pekilo, una micoproteína derivada de la fermentación del hongo filamentoso *Paecilomyces variotii,* el cual contiene alrededor del 60-70% de proteína cruda en base a materia seca, compuestos bioactivos, incluidos β-glucanos y nucleótidos que tienen propiedades inmunomoduladoras (Hooft et al., 2024) **(Tabla 5)**. Su producción implica la fermentación de residuos líquidos agroindustriales, como la vinaza de la producción de bioetanol de maíz, lo que la convierte en un ingrediente ambientalmente sostenible (Dias et al., 2026). Por su composición nutricional, se ha optado por utilizarla como sustituto de la harina de pescado como único suplemento proteico en dietas de animales (ej. cerdos) (Barber et al., 1977).

En síntesis, los resultados de los estudios demostraron que la suplementación dietética con SCP mejora significativamente el crecimiento animal, peso corporal, activa mecanismos de defensa

inmunitaria, ejerce actividad inmunoestimulante y antibacteriana que previene enfermedades y mejora la defensa antioxidante en el animal (Y. Li et al., 2025). Por ello, la proteína unicelular se considera una fuente alternativa para sustituir, suplementar o complementar dietas de animales como engorde de cerdos, pollos, pavos, terneros y pescados (Páez et al., 2008; Suman et al., 2015). Sin embargo, se debe tener en cuenta que los valores nutritivos y alimenticios del producto final van a variar según los microorganismos utilizados, el método de recolección, secado y procesamiento (Suman et al., 2015).

5.4. Viabilidad y sostenibilidad del uso de SCP en la suplementación pecuaria

5.4.1. Aspectos económicos

La proteína unicelular ha adquirido un interés comercial durante la última década debido a que se puede utilizar como fuente proteica destinada a la alimentación animal. Según Amara & El-Baky (2023), el mercado de SCP en 2021 fue superior a los 8 mil millones de USD y se proyecta una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) superior al 9% entre 2022 y 2030; así, el mercado superará los 18,5 mil millones de USD. La viabilidad económica de su producción depende de factores como la tasa de crecimiento, el contenido proteico, la necesidad de nutrientes suplementarios, el uso de medios de cultivo de transición y el proceso de separación y secado (Al-Mudhafr & Al-Garawyi, 2019). Dado que las materias primas representan entre el 45% y el 75% del coste total del proceso de producción, se emplean materias primas económicas, especialmente subproductos industriales, como fuente de nutrientes para promover la producción industrial de SCP (Y. Li et al., 2025)

Sin embargo, existen desafíos económicos que limitan su competitividad ante fuentes proteicas convencionales. Lourens et al. (2025) reportaron que el precio mínimo de venta del alimento para animales enriquecido con SCP es de 0,69 US$/kg, valor superior al precio de mercado de alimentos para animales como la harina de soja, cuyo costo ronda alrededor de 0,40 US$/kg. Sin embargo, varios factores como el impacto negativo de la industria ganadera, los precios en aumento

de la harina de pescado y la presión ambiental asociada con la producción masiva de la soja están impulsando la exploración de alternativas microbianas (Hugo & Venegas, n.d.). En este contexto, la biomasa unicelular representa una buena solución al implementarse en países menos desarrollados, especialmente a medida que las tecnologías de procesamiento poscosecha y las biotecnologías se vuelven mejores y más asequibles (Pexas et al., 2023). Además, su producción se alinea estrechamente en el marco de la economía circular, ya que promueve el uso de recursos y la reducción de la generación de residuos, esto al priorizar la reutilización, reparación y reciclaje de materiales (Alves et al., 2025).

5.4.2. Aspectos ambientales

Actualmente, la cadena de suministro de alimentos genera aproximadamente 13,700 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq); estas emisiones, junto con la deforestación, la acidificación terrestre global y la eutrofización, alteran la composición de especies en los ecosistemas naturales, reduciendo la biodiversidad y la resiliencia ecológica (Poore & Nemecek, 2018). Ante este panorama, la FAO propone la producción de fuentes de proteínas alternativas y sostenibles, con el potencial de reemplazar las fuentes de proteínas convencionales de origen vegetal o animal (ej. harina de soja, granos y cereales) que se utilizan actualmente en la alimentación animal (Uwineza et al., 2024). Por ello, la producción de proteína unicelular a partir de biomasa de algas, levaduras, hongos y células bacterianas, se ha consolidado como una fuente innovadora para la producción de piensos o aditivos alimentarios ricos en proteínas, producibles con una menor huella ambiental (Matassa et al., 2016). La principal ventaja de la SCP es su sostenibilidad ambiental debido a sus menores requerimientos de tierra y agua, así como sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero (Portal D'almeida & Lima De Albuquerque, 2025). Además, se ha optado por el uso de materias primas para su producción a partir de residuos económicos, fácilmente disponibles cuyo procesamiento ayuda a reducir la contaminación ambiental y los costos de producción (Bratosin et al., 2021). El cultivo de SCP puede lograr una transformación eficiente de varios residuos como los de tipo

agrícola (ej. paja de arroz, cáscara de arroz, estiércol y residuos ricos en almidón), alimentario (ej. cascaras de naranja y papa) y restos lignocelulósicos que se fermentan bajo entornos controlados, eliminando la necesidad de pesticidas y herbicidas (Alves et al., 2025; Bratosin et al., 2021; Kelechi M. Ukaegbu-Obi, 2016). Al desarrollar industrialmente el uso de estos biorresiduos, una gran cantidad de ellos podría tener una utilidad económica como piensos ricos en proteínas, que podrían servir como suplementos proteicos para la alimentación humana y animal, además de ayudar a controlar la contaminación y a eliminar algunos problemas de eliminación de residuos. (Kelechi M. Ukaegbu-Obi, 2016; Sekoai et al., 2024)

Un ejemplo que respalda los beneficios ambientales fue evaluado por Bergman et al. (2024) quienes confirmaron el potencial de la SCP de *Paecilomyces variotii,* cultivado en un subproducto de la industria forestal, como sustituto del concentrado de proteína de soja en la suplementación de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Los resultados sugirieron que la proteína unicelular del hongo filamentoso se asoció con menores impactos ambientales en términos de cambio climático, eutrofización de agua dulce, acidificación e impacto en la biodiversidad por el uso de la tierra, y requirió una menor superficie de tierra en comparación con el concentrado de proteína de soja.

No obstante, sus desventajas son los requisitos energéticos para el funcionamiento y calentamiento de los biorreactores, el calor para el secado, la electricidad para la cosecha y principalmente la extracción de proteínas. Sin embargo, estas demandas suelen ser significativamente inferiores en comparación con la producción de proteína animal (Nirmal et al., 2025; Spiller et al., 2020). Por ello, la producción de SCP requiere más investigación sobre la ampliación de la producción y la mejora del desempeño ambiental, teniendo en cuenta las consecuencias negativas en el calentamiento global, el consumo de agua, la acidificación y las emisiones por eutrofización, en comparación con otros piensos, la utilización de SCP para suplementación puede aportar beneficios ambientales al ecosistema y la biodiversidad mediante la reducción del uso del suelo (Kobayashi et al., 2023).

5.4.3. Regulaciones y seguridad alimentaria

La producción y distribución comercial de la proteína unicelular está sujeta a un marco regulatorio integral que establece requisitos relacionados a los niveles de nutrientes y aminoácidos esenciales para la salud animal, asegurando que las formulaciones de piensos a partir de SCP sean adecuadas para el bienestar del ganado (Y. P. Li et al., 2024b). Al ser un producto novedoso, su producción requiere procesos exhaustivos de saneamiento y purificación para evitar el deterioro y la contaminación por microorganismos patógenos y toxigénicos durante su cultivo; bajo este contexto, la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) y el Grupo de Evaluación de Proteínas de las Naciones Unidas han desarrollado directrices para la evaluación de la seguridad de los productos de SCP en humanos y ganado doméstico (Ravindra, 2000).

En la Unión Europea, la SCP se clasifica como un “nuevo alimento”, por lo que está regulada por los Reglamentos (UE) 2015/2283, que establece los procedimientos de evaluación y autorización para ingredientes o procesos que no se consumían de forma significativa antes de 1997 y por la normativa (CE) 852/2004 y 853/2004 que aseguran el cumplimiento de las normativas de higiene alimentaria (Hadi & Brightwell, 2021). Consecuentemente, el registro de nuevos alimentos como la proteína unicelular requiere la recopilación de expedientes técnicos detallados que demuestren la seguridad del producto (Sekoai et al., 2024).

Asimismo, es necesaria la selección de cepas microbianas nuevas y mejor adaptadas que cuenten con el estatus GRAS (generalmente reconocidas como seguras) o QPS (presunto cualificado de seguridad); de lo contrario, requieren la aprobación de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) para su consumo en Europa (Lübeck & Lübeck, 2022). Este requisito resulta importante debido a que varios microorganismos poseen un alto contenido de ácidos nucleicos, que

puede alcanzar hasta el 16% de la materia seca, además de la posible presencia de toxinas y micotoxinas que representan un riesgo potencial para la salud animal (Nirmal et al., 2025).

Por ello, para su producción a gran escala, la implementación de buenas prácticas de fabricación (BPF) es fundamental, ya que permite garantizar una calidad constante del producto, mantener el cumplimiento normativo y minimizar las preocupaciones de seguridad con respecto a contaminantes, así garantizando el uso seguro y eficaz de las SCP como fuente de proteína viable (Alves et al., 2025; Chamodi et al., 2025a). Finalmente, se prevé que el uso extensivo de SCP de valor añadido contribuya en el nuevo milenio a la erradicación de la desnutrición crónica a nivel mundial, ayudando a reducir la brecha entre la oferta y la demanda (Y. P. Li et al., 2024b).

6. CONCLUSIONES

La proteína unicelular (SCP) representa actualmente una fuente alternativa viable para la suplementación pecuaria, capaz de sustituir parcial o totalmente la dependencia de fuentes proteicas convencionales de origen vegetal y animal, como la harina de soja y de pescado. Estas fuentes tradicionales enfrentan desafíos relacionados con la sostenibilidad ambiental y limitaciones nutricionales en animales, como su baja digestibilidad, lo que limita su eficiencia. Por ello, el uso de microorganismos se propone como una alternativa prometedora para la alimentación animal.

Los microorganismos productores de SCP, incluyendo bacterias, levaduras, hongos filamentosos, microalgas y cianobacterias, presentan características óptimas para la nutrición animal debido a su alto contenido proteico. Además, aportan aminoácidos esenciales, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos que favorecen significativamente a la salud, crecimiento y desempeño animal. Sin embargo, la composición nutricional, la digestibilidad y el rendimiento productivo final dependen del microorganismo empleado, el sustrato para su cultivo y de las condiciones de fermentación empleadas.

Se identificaron diversas especies microbianas utilizadas para la producción de proteína unicelular. Entre las bacterias, destacan *Methylococcus capsulatus* y cepas del género *Bacillus*, reconocidas por su alto valor proteico y la capacidad de crecer en varios sustratos. En cuanto a las levaduras, sobresalen especies del género *Candida*, así como la más destacada *Saccharomyces cerevisiae,* valoradas por su perfil aminoacídico y propiedades probióticas. Por su parte, entre hongos filamentosos se distinguen *Fusarium venenatum*, *Aspergillus oryzae* y *Paecilomyces variotii,* las cuales actualmente cuentan con producción comercial a gran escala. Finalmente, dentro de las microalgas y

cianobacterias, las especies más relevantes corresponden a los géneros *Chlorella* y *Spirulina* por su alto contenido proteico y lipídico. La selección de estas especies depende de sus características nutricionales, digestibilidad, adaptación a sustratos de bajo costo, seguridad alimentaria y facilidad de procesamiento para determinar su potencial para la producción de SCP.

En términos ambientales, la producción de SCP tiene un menor impacto ambiental en comparación con fuentes proteicas convencionales, debido a que aprovecha eficientemente residuos y subproductos agroindustriales de bajo costo y sostenibles como sustratos de fermentación. Además, requiere cantidades mínimas de tierra cultivable y agua dulce, y no depende de factores climáticos, lo que la convierte en un modelo de economía circular que contribuye~~n~~ a una producción pecuaria balanceada y sostenible.

Asimismo, diversos estudios revisados evidencian que la inclusión de SCP en la dieta diaria de diversas especies pecuarias como peces, cerdos, aves y rumiantes mejora significativamente parámetros productivos, como la ganancia de peso, crecimiento, salud intestinal, eficiencia alimenticia, estimulación de la respuesta inmunitaria y potenciación de las defensas antibacterianas y antioxidantes, lo que favorece un desarrollo reproductivo óptimo de los animales.

Sin embargo, pese a sus ventajas nutricionales y ambientales, la producción de SCP enfrenta desafíos para su viabilidad comercial a gran escala. Entre ellas destacan, su elevado costo de producción, la necesidad de procesos de purificación para reducir el contenido de ácidos nucleicos (ARN), que pueden actuar como factor antinutricional, y la baja digestibilidad de ciertas fuentes microbianas debido a la rigidez de la pared celular en algunos hongos y microalgas si no se aplican tratamientos físicos, químicos o enzimáticos previos. Además, es indispensable que la SCP cumpla con

estrictos estándares de inocuidad, composición nutricional y regulaciones alimentarias para promover su comercialización masiva en la suplementación pecuaria.

En conjunto, la aceptación e integración de la proteína unicelular en la industria pecuaria depende de su alto potencial para mejorar la nutrición, seguridad y sostenibilidad alimentaria de las especies animales. No obstante, su adopción a gran escala requiere avances biotecnológicos que permitan optimizar los procesos productivos, reducir los costos de producción y fortalecer la confianza de productores y consumidores en esta fuente alternativa de proteína.

7. RECOMENDACIONES

Con base en la revisión bibliográfica, se proponen las siguientes recomendaciones para la implementación de microorganismos como proteína unicelular en la suplementación pecuaria. En primer lugar, es necesario fomentar investigaciones orientadas a optimizar los procesos de fermentación y las etapas posteriores de recuperación de biomasa, especialmente se debe priorizar el desarrollo de técnicas de separación, ruptura celular y secado de bajo consumo energético. Estas mejoras no solo reducirán los costos de producción, sino que incrementarán la calidad nutricional y el perfil proteico de la biomasa, y se garantizará un producto final inocuo y seguro, logrando así una competitividad frente a fuentes proteicas tradicionales. Asimismo, se requiere evaluar el potencial de residuos agroindustriales de bajo costo disponibles a nivel nacional e internacional como sustratos alternativos para la producción de SCP. Lo que favorecería el aprovechamiento de recursos locales, disminuiría el impacto ambiental y mejoraría la rentabilidad económica de su producción.

Finalmente, es fundamental promover el desarrollo de marcos regulatorios y protocolos de control de calidad que garanticen la seguridad alimentaria de aditivos y piensos elaborados con SCP. De este modo, se permitirá su comercialización masiva y se incrementará la aceptación de la proteína unicelular por parte del sector pecuario como suplemento en la alimentación animal.

8. REFERENCIAS

Abakoura Barka, & Christophe Blecker. (2016). *MICROALGAE AS A POTENTIAL SOURCE OF SINGLE-CELL PROTEINS*.

Abedfar, A., Abbaszadeh, F., & Mardiha, F. (2025). A Review on the Importance of Producing Single-Cell Protein (SCP) from Agricultural By-products and Waste. *Chemical and Biomolecular Engineering*, *10*(1), 8–15. https://doi.org/10.11648/j.cbe.20251001.12

Ahmed, M. G., Gouda, S. A., Donia, S., & Hassanein, N. M. (2025). Production of single cell protein by fungi from different food wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *15*(4), 5447–5462. https://doi.org/10.1007/s13399-024-05478-5

Alemu, T. (2014). SINGLE CELL PROTEIN EXTRACTION FROM ORANGE WASTES USING ASPERGILLUS NIGER ISOLATE NO. 5 UNDER SOLID STATE FERMENTATION. *J. Biol. Sci*, *13*(2), 87–98.

Al-Mudhafr, A. W. H., & Al-Garawyi, A. M. A. (2019). Microbiological Sources and Nutritional Value of Single Cell Protein (SCP). *International Journal For Research in Applied Sciences and Biotechnology*, *06*(06), 1–3. https://doi.org/10.31033/ijrasb.6.6.1

Alves, S. J. F., Pires, E. B. E., Alexandre, M. A. da S., Santos, C. C. A. do A., Martin, J. G. P., Campelo, P. H., Martins, E., & Eller, M. R. (2025). Single-cell proteins as alternative sources of proteins and nutrients. In *Food Research International* (Vol. 214). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116631

Amara, A. A., & El-Baky, N. A. (2023). Fungi as a Source of Edible Proteins and Animal Feed. In *Journal of Fungi* (Vol. 9, Number 1). MDPI. https://doi.org/10.3390/jof9010073

Amorim, M. L., Soares, J., Coimbra, J. S. dos R., Leite, M. de O., Albino, L. F. T., & Martins, M. A. (2021). Microalgae proteins: production, separation, isolation, quantification, and application in food and

feed. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 61, Number 12, pp. 1976–2002). Bellwether Publishing, Ltd. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1768046

Amorim, M. L., Soares, J., Vieira, B. B., Batista-Silva, W., & Martins, M. A. (2020). Extraction of proteins from the microalga Scenedesmus obliquus BR003 followed by lipid extraction of the wet deproteinized biomass using hexane and ethyl acetate. *Bioresource Technology*, *307*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123190

Bajpai, P. (2017). *SPRINGER BRIEFS IN MOLECULAR SCIENCE GREEN CHEMISTRY FOR SUSTAINABILITY Single Cell Protein Production from Lignocellulosic Biomass*. http://www.springer.com/series/10045

Bakratsas, G., Polydera, A., Nilson, O., Kossatz, L., Xiros, C., Katapodis, P., & Stamatis, H. (2023). *Single-cell protein production by Pleurotus ostreatus in submerged fermentation †*. https://doi.org/10.1039/d2□00058j

Barber, R. S., Braude, R., & Mitchell, K. G. (1977). THE VALUE OF "PEKILO PROTEIN" FOR GROWING PIGS. In *Animal Feed Science and Technology* (Vol. 2).

Bergman, K., Woodhouse, A., Langeland, M., Vidakovic, A., Alriksson, B., & Hornborg, S. (2024). Environmental and biodiversity performance of a novel single cell protein for rainbow trout feed. *Science of the Total Environment*, *907*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168018

Berzina, I., Kalnins, M., Geiba, Z., Raita, S., Palcevska, J., Mika, T., & Spalvins, K. (2024). Creating Single-Cell Protein-Producing Bacillus subtilis Mutants Using Chemical Mutagen and Amino Acid Inhibitors. *Scientifica*, *2024*(1). https://doi.org/10.1155/sci5/8968295

Borujeni, N. E., Karimi, K., Denayer, J. F. M., & Kumar, R. (2022). Apple pomace biorefinery for ethanol, mycoprotein, and value-added biochemicals production by Mucor indicus. *Energy*, *240*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122469

Bratosin, B. C., Darjan, S., & Vodnar, D. C. (2021). Single cell protein: A potential substitute in human and animal nutrition. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Number 16). MDPI. https://doi.org/10.3390/su13169284

Busti, S., Kortner, T. M., Valen, E. C., Benini, E., Bonaldo, A., Xiros, C., Brambilla, F., Scicchitano, D., Palladino, G., Candela, M., Berrettini, M., Dondi, F., Ferrari, M. G., Gatta, P. P., & Parma, L. (2026). Dietary Paecilomyces variotii single-cell protein supports growth and intestinal health in gilthead sea bream. *Aquaculture*, *616*. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2026.743729

Capson-Tojo, G., Batstone, D. J., Grassino, M., Vlaeminck, S. E., Puyol, D., Verstraete, W., Kleerebezem, R., Oehmen, A., Ghimire, A., Pikaar, I., Lema, J. M., & Hülsen, T. (2020). Purple phototrophic bacteria for resource recovery: Challenges and opportunities. In *Biotechnology Advances* (Vol. 43). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107567

Chae, S. R., Hwang, E. J., & Shin, H. S. (2006). Single cell protein production of Euglena gracilis and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. *Bioresource Technology*, *97*(2), 322–329. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.037

Chamodi, K. K. D., Vu, N. T., Domingos, J. A., & Loh, J. Y. (2025a). Cellular Solutions: Evaluating Single-Cell Proteins as Sustainable Feed Alternatives in Aquaculture. In *Biology* (Vol. 14, Number 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/biology14070764

Chamodi, K. K. D., Vu, N. T., Domingos, J. A., & Loh, J. Y. (2025b). Cellular Solutions: Evaluating Single-Cell Proteins as Sustainable Feed Alternatives in Aquaculture. In *Biology* (Vol. 14, Number 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/biology14070764

Chee, J. Y., Lakshmanan, M., Farahin Jeepery, I., Husna, N., Hairudin, M., & Sudesh, K. (2019). The Potential Application of Cupriavidus necator as Polyhydroxy-alkanoates Producer and Single Cell Protein: A Review on Scientific, Cultural and Religious Perspectives. *Review Article APPLIED FOOD BIOTECHNOLOGY*, *6*(1), 19–34. https://doi.org/10.22037/afb.v%vi%i.22234

Cheng, Y. C., & Kim, S. W. (2022a). Use of Microorganisms as Nutritional and Functional Feedstuffs for Nursery Pigs and Broilers. In *Animals* (Vol. 12, Number 22). MDPI. https://doi.org/10.3390/ani12223141

Cheng, Y. C., & Kim, S. W. (2022b). Use of Microorganisms as Nutritional and Functional Feedstuffs for Nursery Pigs and Broilers. In *Animals* (Vol. 12, Number 22). MDPI. https://doi.org/10.3390/ani12223141

Dalbanjan, N. P., Eelager, M. P., & Narasagoudr, S. S. (2024). Microbial protein sources: A comprehensive review on the potential usage of fungi and cyanobacteria in sustainable food systems. *Food and Humanity*, *3*. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100366

Dias, K. M. M., de Oliveira, C. H., Lima, I. L., de Almeida, B. F., Vivan, L. Q., & Calderano, A. A. (2026). Nutritional value of Pekilo (Paecilomyces variotii) for broiler chickens: Metabolizable energy, amino acid digestibility, and growth performance. *Animal Feed Science and Technology*, *340*. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2026.116817

Dong, L., Wu, Y., Li, M., Zhang, C., Cao, J., Ledesma-Amaro, R., Zhao, W., & Kang, D. (2025). *Exploring the Fermentation Potential of Kluyveromyces marxianus NS127 for Single-Cell Protein Production*. https://doi.org/10.3390/fermentation

Dunuweera, A. N., Nikagolla, D. N., & Ranganathan, K. (2021). Fruit Waste Substrates to Produce Single-Cell Proteins as Alternative Human Food Supplements and Animal Feeds Using Baker's Yeast (Saccharomyces cerevisiae). *Journal of Food Quality*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/9932762

Farstad, L. (1977). Biological Effects of Feeding Single Cell Protein Produced by Pseudomonas methylotropha from Methanol to Chickens. *Acta Agriculturae Scandinavica*, *27*(2), 129–137. https://doi.org/10.1080/00015127709435121

Forero-Ararat, V., Gómez-Viera, S., Penagos-Montaña, N., & Porras-Osorio, L. F. (2021). *Artículo de Revisión MICROORGANISMOS: UNA PERSPECTIVA ACTUAL*. http://revistareciteia.es.tl/

Gao, L., Khoo, S. C., Zhang, Z., & Wu, X. (2026). Trends in sustainable single-cell protein from non-grain feedstocks. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 44, Number 1, pp. 65–78). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2025.04.018

Gibbs, P. A., Seviour, R. J., & Schmid, F. (2000). Growth of filamentous fungi in submerged culture: Problems and possible solutions. In *Critical Reviews in Biotechnology* (Vol. 20, Number 1, pp. 17–48). CRC Press LLC. https://doi.org/10.1080/07388550091144177

Gracious, M., & Nandakumar, S. (2025). Optimization of Bacillus subtilis PW12 biomass production using RSM: a preliminary study towards single-cell protein production for aquaculture. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, *13*(1), 83–92. https://doi.org/10.7324/JABB.2024.177031

Grdeń, A. S., & Sołowiej, B. G. (2022). Macronutrients, Amino and Fatty Acid Composition, Elements, and Toxins in High-Protein Powders of Crickets, Arthrospira, Single Cell Protein, Potato, and Rice as Potential Ingredients in Fermented Food Products. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(24). https://doi.org/10.3390/app122412831

Gundupalli, M. P., Ansari, S., Vital da Costa, J. P., Qiu, F., Anderson, J., Luckert, M., & Bressler, D. C. (2024). Bacterial single cell protein (BSCP): A sustainable protein source from methylobacterium species. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 147). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104426

Hadi, J., & Brightwell, G. (2021). Safety of alternative proteins: Technological, environmental and regulatory aspects of cultured meat, plant-based meat, insect protein and single-cell protein. *Foods*, *10*(6). https://doi.org/10.3390/foods10061226

Hassan Farooq, M., Naureen, A., Sarwar, A., Nelofer, R., Nadeem, M., Aziz, T., Alomran, M. M., Shami, A., Al-Asmari, F., A. Al-Joufi, F., Mahady Nahari, A., & Jalal, R. S. (2025). Optimization of fermentation parameters for enhanced and low-cost production of single-cell protein from rice polishing using *Rhizopus oligosporus*. *Italian Journal of Food Science*, *37*(4), 219–232. https://doi.org/10.15586/ijfs.v37i4.3142

Hooft, J. M., Montero, R., Morales-Lange, B., Blihovde, V. F., Purushothaman, K., Press, C. M. L., Mensah, D. D., Agboola, J. O., Javed, S., Mydland, L. T., & Øverland, M. (2024). Paecilomyces variotii (PEKILO®) in novel feeds for Atlantic salmon: Effects on pellet quality, growth performance, gut health, and nutrient digestibility and utilization. *Aquaculture*, *589*. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740905

Hosseini, S. M., & Khosravi-Darani, K. (2011). Response Surface Methodology for Mycoprotein Production by Fusarium Venenatum ATCC 20334. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, *01*(01). https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000102

Huang, H. M., Xue, Z. X., Jiang, Y. F., Li, R., Guo, R. B., Fan, X. L., & Fu, S. F. (2024). New approach for raw biogas: Production of single cell protein by sulfide-tolerant methane-oxidizing bacteria consortia. *Chemical Engineering Journal*, *495*. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153678

Hugo, V., & Venegas, E. (n.d.). *Proteínas microbianas sostenibles: un enfoque prometedor*. https://doi.org/10.5281/zenodo.12792361

Ibarruri, J., & Hernández, I. (2019). Valorization of cheese whey and orange molasses for fungal biomass production by submerged fermentation with Rhizopus sp. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *42*(8), 1285–1300. https://doi.org/10.1007/s00449-019-02127-4

Janssen, M., Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2022). Microalgae based production of single-cell protein. In *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 75). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102705

Jones, S. W., Karpol, A., Friedman, S., Maru, B. T., & Tracy, B. P. (2020). Recent advances in single cell protein use as a feed ingredient in aquaculture. In *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 61, pp. 189–197). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.12.026

Kelechi M. Ukaegbu-Obi. (2016). *Citation: Kelechi M. Ukaegbu-Obi. Single Cell Protein: A Resort to Global Protein Challenge and Waste Management Single Cell Protein: A Resort to Global Protein Challenge and Waste Management*.

Khan, A. R., Ahmad, B., Khan, M., Khan, M. A., Sultan, S., Sultana, K., & Hassan, S. (2024). Production of Single Cell Protein (SCP) from the Peel Waste of Pea, Potato, and Banana by Aspergillus Flavus NRRL 21882 as an Efficient Organic Poultry Supplement. *ACS Omega*, *9*(36), 37763–37770. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03317

Khan, M., Khan, S. S., Ahmed, Z., & Tanveer, A. (2010). *Production of Single Cell Protein from Saccharomyces cerevisiae by utilizing Fruit Wastes* (Vol. 1, Number 2).

Khan, M. Y., Naqvi, S. H. A., & Dahot, M. U. (2011). BIOCHEMICAL, HAEMATOLOGICAL AND HISTOLOGICAL STUDIES ON BROILER CHICKS FED SINGLE CELL PROTEIN BIOMASS BY PENICILLIUM EXPANSUM. *J. Biotechnol*, *8*(1), 7–16.

Kholif, A. E., & Olafadehan, O. A. (2021). Chlorella vulgaris microalgae in ruminant nutrition: A review of the chemical composition and nutritive value. In *Annals of Animal Science* (Vol. 21, Number 3, pp. 789–806). Sciendo. https://doi.org/10.2478/aoas-2020-0117

Khumchai, J., Wongchai, A., On-uma, R., Sabour, A., Alshiekheid, M., Narayanan, M., Karuppusamy, I., Pugazhendhi, A., Brindhadevi, K., & Lan Chi, N. T. (2022). A viable bioremediation strategy for treating paper and pulp industry effluents and assessing the prospect of resulted bacterial biomass as single cell protein (SCP) using indigenous bacterial species. *Chemosphere*, *304*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135246

Kobayashi, Y., EL-Wali, M., Guðmundsson, H., Guðmundsdóttir, E. E., Friðjónsson, Ó. H., Karlsson, E. N., Roitto, M., & Tuomisto, H. L. (2023). Life-cycle assessment of yeast-based single-cell protein production with oat processing side-stream. *Science of the Total Environment*, *873*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162318

Koukoumaki, D. I., Tsouko, E., Papanikolaou, S., Ioannou, Z., Diamantopoulou, P., & Sarris, D. (2024a). Recent advances in the production of single cell protein from renewable resources and applications. In *Carbon Resources Conversion* (Vol. 7, Number 2). KeAi Publishing Communications Ltd. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.07.004

Koukoumaki, D. I., Tsouko, E., Papanikolaou, S., Ioannou, Z., Diamantopoulou, P., & Sarris, D. (2024b). Recent advances in the production of single cell protein from renewable resources and applications. In *Carbon Resources Conversion* (Vol. 7, Number 2). KeAi Publishing Communications Ltd. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.07.004

Kurbanoglu, E. B., & Algur, O. F. (2002). *Single-cell protein production from ram horn hydrolysate by bacteria*.

Landeta-Salgado, C., Cicatiello, P., & Lienqueo, M. E. (2021). Mycoprotein and hydrophobin like protein produced from marine fungi Paradendryphiella salina in submerged fermentation with green seaweed Ulva spp. *Algal Research*, *56*. https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102314

Lapeña, D., Kosa, G., Hansen, L. D., Mydland, L. T., Passoth, V., Horn, S. J., & Eijsink, V. G. H. (2020). Production and characterization of yeasts grown on media composed of spruce-derived sugars and protein hydrolysates from chicken by-products. *Microbial Cell Factories*, *19*(1). https://doi.org/10.1186/s12934-020-1287-6

Lemire, K. A., Rodriguez, Y. Y., & McIntosh, M. T. (2016). Alkaline hydrolysis to remove potentially infectious viral RNA contaminants from DNA. *Virology Journal*, *13*(1). https://doi.org/10.1186/s12985-016-0552-0

Li, Y. P., Ahmadi, F., Kariman, K., & Lackner, M. (2024a). Recent advances and challenges in single cell protein (SCP) technologies for food and feed production. In *npj Science of Food* (Vol. 8, Number 1). Nature Research. https://doi.org/10.1038/s41538-024-00299-2

Li, Y. P., Ahmadi, F., Kariman, K., & Lackner, M. (2024b). Recent advances and challenges in single cell protein (SCP) technologies for food and feed production. In *npj Science of Food* (Vol. 8, Number 1). Nature Research. https://doi.org/10.1038/s41538-024-00299-2

Li, Y., Wu, J., Wu, P., Wang, C., Huang, R., & Zhang, J. (2025). Production of single cell protein from sugarcane molasses for feed protein and techno-economic analysis. *Process Biochemistry*, *157*, 308–317. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2025.08.003

Liu, K., Huang, S., Zhang, L., Xiong, Y., Wang, X., Bao, Y., Li, D., & Li, J. (2024). Efficient production of single cell protein from biogas slurry using screened alkali-salt-tolerant Debaryomyces hansenii. *Bioresource Technology*, *393*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130119

Liu, L., Feizi, A., Österlund, T., Hjort, C., & Nielsen, J. (2014). Genome-scale analysis of the high-efficient protein secretion system of Aspergillus oryzae. *BMC Systems Biology*, *8*(1). https://doi.org/10.1186/1752-0509-8-73

Liu, R., Xing, S., Cheng, H., Liang, X., Wang, J., Wang, J., Longshaw, M., Hou, L., Xue, M., & Wang, H. (2023). Effects of a novel bacteria meal (FeedKind®) on the physical properties of extrudates. *Aquaculture Reports*, *33*. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101744

Longshaw, M., Quest, B., Miller, W., Oba, P. M., Swanson, O. R., Swanson, K. S., & Miller, K. (2025). The Safety of FeedKind Pet® (Methylococcus capsulatus, Bath) as a Cultured Protein Source in the Diet of Adult Dogs and Its Effect on Feed Digestibility, Fecal Microbiome, and Health Status. *Animals*, *15*(13). https://doi.org/10.3390/ani15131975

Lourens, V., Bosman, C. E., Petersen, A. M., Coetzee, G., Görgens, J. F., & van Rensburg, E. (2025). Simultaneous enzymatic hydrolysis and bioconversion of deacetylated and disk refined sugarcane bagasse to single-cell protein: An experimental investigation and techno-economic analysis. *Biochemical Engineering Journal*, *218*. https://doi.org/10.1016/j.bej.2025.109691

Lübeck, M., & Lübeck, P. S. (2022). Fungal Cell Factories for Efficient and Sustainable Production of Proteins and Peptides. In *Microorganisms* (Vol. 10, Number 4). MDPI. https://doi.org/10.3390/microorganisms10040753

Magalhães, C. E. B., Souza-Neto, M. S., Astolfi-Filho, S., & Matos, I. T. S. R. (2018). Candida tropicalis able to produce yeast single cell protein using sugarcane bagasse hemicellulosic hydrolysate as carbon source. *Biotechnology Research and Innovation*, *2*(1), 19–21. https://doi.org/10.1016/j.biori.2018.08.002

Mahan, K. M., Le, R. K., Wells, T., Anderson, S., Yuan, J. S., Stoklosa, R. J., Bhalla, A., Hodge, D. B., & Ragauskas, A. J. (2018). Production of single cell protein from agro-waste using Rhodococcus opacus. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *45*(9), 795–801. https://doi.org/10.1007/s10295-018-2043-3

Mahdy, M. A., Jamal, M. T., Al-Harb, M., Al-Mur, B. A., & Haque, M. F. (2022). Use of yeasts in aquaculture nutrition and immunostimulation: A review. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, *10*(5), 59–65. https://doi.org/10.7324/JABB.2022.100507

Majumder, R., Miatur, S., Saha, A., & Hossain, S. (2023). Mycoprotein: production and nutritional aspects: a review. In *Sustainable Food Technology* (Vol. 2, Number 1, pp. 81–91). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/d3fb00169e

Manjula, M., & Subasri, J. (2018). Biochemical analysis of spirulina platensis (single cell protein, scp) under in different concentration of rice mill effluent. In *International Journal of Current Research in Life Sciences* (Vol. 7, Number 04). http://www.ijcrls.com

Marchi, A., Bonaldo, A., Scicchitano, D., Candela, M., De Marco, A., Falciglia, S., Mazzoni, M., Lattanzio, G., Clavenzani, P., Dondi, F., Gatta, P. P., & Parma, L. (2023). Feeding gilthead sea bream with increasing dietary bacterial single cell protein level: Implication on growth, plasma biochemistry, gut histology, and gut microbiota. *Aquaculture*, *565*. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.739132

Marius, K. S., Mahamadi, N., Ibrahim, K., Iliassou, M., Sonagnon, H. S. K., Yerobessor, D., Wahauwouele, H. C., Essodolom, T., & Alfred, S. T. (2018). Production of single cell protein (SCP) and essentials amino acids from Candida utilis FMJ12 by solid state fermentation using mango waste supplemented with nitrogen sources. *African Journal of Biotechnology*, *17*(23), 716–723. https://doi.org/10.5897/ajb2017.16361

Massimiliano Lanza, Marco Battelli, Luigi Gallo, Francesca Soglia, Fulvia Bovera, Francesco Giunta, Riccardo Primi, Luisa Biondi, Diana Giannuzzi, Marco Zampiga, Nicola Francesco Addeo, Antonello

Cannas, Pier Paolo Danieli Bruno Ronchi, & Gianni Matteo Crovetto. (2025). *SOSTENIBILIDAD DE LAS CADENAS DE PRODUCCION ANIMAL*.

Matassa, S., Boon, N., Pikaar, I., & Verstraete, W. (2016). Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint. *Microbial Biotechnology*, *9*(5), 568–575. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12369

Mohamed Al-Farsi, Alaa Al Bakir, Hassan Al Marzouqi, & Rejoo Thomas. (2019). Production of Single Cell Protein from Date Waste. *By-Products of Palm Trees and Their Applications*, *11*, 303–312. https://doi.org/10.21741/9781644900178-26

Molnár, J., Vasas, D., Kalocsai, R., Szakál, T., & Ahmed, M. H. (2022). Production of Single Cell Protein by the fermentation biotechnology for Animal Feeding. *Elelmiszervizsgalati Kozlemenyek*, *68*(2), 3896–3903. https://doi.org/10.52091/EVIK-2022/2-3-ENG

Montenegro-Herrera, C. A., Vera-López Portillo, F., Hernández-Chávez, G. T., & Martinez, A. (2022). Single-cell protein production potential with the extremophilic red microalgae Galdieria sulphuraria: growth and biochemical characterization. *Journal of Applied Phycology*, *34*(3), 1341–1352. https://doi.org/10.1007/s10811-022-02733-y

Nineteen Fransiska. (2003). *THE GROWTH AND POTENTIAL OF SINGLE CELL PROTEIN (SCP) PRODUCTION FROM GREEN MICROALGAE (Chlorella vulgaris Bey) IN LIQUID WASTE OF TAPIOCA*.

Nirmal, N., Anyimadu, C. F., Khanashyam, A. C., Bekhit, A. E. din A., & Dhar, B. K. (2025). Alternative Protein Sources: Addressing Global Food Security and Environmental Sustainability. In *Sustainable Development* (Vol. 33, Number 3, pp. 3958–3969). John Wiley and Sons Ltd. https://doi.org/10.1002/sd.3338

Ogbuewu, I. P., Okoro, V. M., Mbajiorgu, E. F., & Mbajiorgu, C. A. (2019). Yeast (Saccharomyces cerevisiae) and its effect on production indices of livestock and poultry—a review. In *Comparative Clinical Pathology* (Vol. 28, Number 3, pp. 669–677). Springer London. https://doi.org/10.1007/s00580-018-2862-7

Oliveira, S. D., de Araújo Padilha, C. E., Asevedo, E. A., Pimentel, V. C., de Araújo, F. R., de Macedo, G. R., & dos Santos, E. S. (2018). Utilization of agroindustrial residues for producing cellulases by Aspergillus fumigatus on Semi-Solid Fermentation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *6*(1), 937–944. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.038

Onyeaka, H., Anumudu, C. K., Okpe, C., Okafor, A., Ihenetu, F., Miri, T., Odeyemi, O. A., & Anyogu, A. (2022). Single Cell Protein for Foods and Feeds: A Review of Trends. *The Open Microbiology Journal*, *16*(1). https://doi.org/10.2174/18742858-v16-e2206160

Pablo, J., & Bellido -1 -, O. (2017). *RESUMEN PFC DISEÑO DE LAS ETAPAS DE FERMENTACIÓN Y DE ACONDICONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE SCP RESUMEN FINAL*.

Páez, G., Jiménez, E., Mármol, Z., Ferrer, J., & Sulbarán, B. (2008). *Amino acids profile of the single cell protein from Kluyveromyces marxianus var. marxianus*.

Patsios, S. I., Dedousi, A., Sossidou, E. N., & Zdragas, A. (2020). Sustainable animal feed protein through the cultivation of YARROWIA lipolytica on agro-industrial wastes and by-products. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Number 4). MDPI. https://doi.org/10.3390/su12041398

Perwez, M., & Al Asheh, S. (2025). Valorization of agro-industrial waste through solid-state fermentation: Mini review. In *Biotechnology Reports* (Vol. 45). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.btre.2024.e00873

Pexas, G., Doherty, B., & Kyriazakis, I. (2023). The future of protein sources in livestock feeds: implications for sustainability and food safety. In *Frontiers in Sustainable Food Systems* (Vol. 7). Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1188467

Philip Thornton, Helen Gurney-Smith, & Eva Wollenberg. (2023). *Alternative sources of protein for food and feed*.

Poore, J., & Nemecek, T. (2018). *Reducing food's environmental impacts through producers and consumers*. http://science.sciencemag.org/

Portal D'almeida, A., & Lima De Albuquerque, T. (2025). *Is It Possible to Produce Meat Without Animals? The Potential of Microorganisms as Protein Sources*. https://doi.org/10.3390/fermentation

Porto, P., & Rodríguez-Forero, A. (2023). Fuentes proteicas alternas como sustituto parcial a la harina de pescado en las formulaciones nutricionales del cultivo de camarón (Litopenaeus vannamei). *Orinoquia*, *27*(2). https://doi.org/10.22579/20112629.767

Rajoka, M. I. (2005). Production of single cell protein through fermentation of a perennial grass grown on saline lands with Cellulomonas biazotea. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *21*(3), 207–211. https://doi.org/10.1007/s11274-004-2889-6

Rao, M., Varma, A. J., & Deshmukh, S. S. (2010). PRODUCTION OF SINGLE CELL PROTEIN, ESSENTIAL AMINO ACIDS, AND XYLANASE BY PENICILLIUM JANTHINELLUM. In *BioResources* (Vol. 5, Number 4).

Ravindra, P. (2000). Value-added food: Single cell protein. In *Biotechnology Advances* (Vol. 18).

Raziq, A. (2020). Single cell protein (SCP) production and potential substrates: A comprehensive review. *Pure and Applied Biology*, *9*(3). https://doi.org/10.19045/bspab.2020.90185

Reihani, S. F. S., & Khosravi-Darani, K. (2019). Influencing factors on single-cell protein production by submerged fermentation: A review. In *Electronic Journal of Biotechnology* (Vol. 37, pp. 34–40). Pontificia Universidad Catolica de Valparaiso. https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2018.11.005

Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein-state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001-2016. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 8, Number OCT). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009

Rompato, M., & Somoza, S. N. (2015). *Protein enrichement of fruit processing byproducts using solid state fermentation with Saccharomyces cerevisiae and Bacillus subtilis*. http://www.lanacion.com.ar/1291722-

Saad, S., Hussien, M. H., Abou-ElWafa, G. S., Aldesuquy, H. S., & Eltanahy, E. (2023). Filter cake extract from the beet sugar industry as an economic growth medium for the production of Spirulina platensis as a microbial cell factory for protein. *Microbial Cell Factories*, *22*(1). https://doi.org/10.1186/s12934-023-02146-7

Safafar, H., Nørregaard, P. U., Ljubic, A., Møller, P., Holdt, S. L., & Jacobsen, C. (2016). Enhancement of protein and pigment content in two Chlorella species cultivated on industrial process water. *Journal of Marine Science and Engineering*, *4*(4). https://doi.org/10.3390/jmse4040084

Salazar-López, N. J., Barco-Mendoza, G. A., Zuñiga-Martínez, B. S., Domínguez-Avila, J. A., Robles-Sánchez, R. M., Ochoa, M. A. V., & González-Aguilar, G. A. (2022). Single-Cell Protein Production as a Strategy to Reincorporate Food Waste and Agro By-Products Back into the Processing Chain. In *Bioengineering* (Vol. 9, Number 11). MDPI. https://doi.org/10.3390/bioengineering9110623

Schulz, E., & Oslage, H. J. (1976). COMPOSITION AND NUTRITIVE VALUE OF SINGLE-CELL PROTEIN (SCP). In *Animal Feed Science and Technology* (Vol. 1).

Sekoai, P. T., Roets-Dlamini, Y., O'Brien, F., Ramchuran, S., & Chunilall, V. (2024). Valorization of Food Waste into Single-Cell Protein: An Innovative Technological Strategy for Sustainable Protein Production. In *Microorganisms* (Vol. 12, Number 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/microorganisms12010166

Seyed Reihani, S. F., & Khosravi-Darani, K. (2018). Mycoprotein production from date waste using Fusarium venenatum in a submerged culture. *Applied Food Biotechnology*, *5*(4), 243–252. https://doi.org/10.22037/afb.v5i4.23139

Sharif, M., Zafar, M. H., Aqib, A. I., Saeed, M., Farag, M. R., & Alagawany, M. (2021). Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition. In *Aquaculture* (Vol. 531). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735885

Silva, J. P. da, Da Silva, G. P. da, Azevedo Neto, A. D. de, & Cazetta, M. L. (2019). Single cell protein production by Wickerhamomyces anomalus CCC32 using crude glycerol. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, *40*(2), 179. https://doi.org/10.5433/1679-0375.2019v40n2p179

Sirakov, I., Velichkova, K., & Nikolov, G. (2012). *The effect of algae meal (Spirulina) on the growth performance and carcass parameters of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss)*.

Spiller, M., Muys, M., Papini, G., Sakarika, M., Buyle, M., & Vlaeminck, S. E. (2020). Environmental impact of microbial protein from potato wastewater as feed ingredient: Comparative consequential life cycle assessment of three production systems and soybean meal. *Water Research*, *171*. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115406

Suman, G., Nupur, M., Anuradha, S., & Pradeep, B. (2015). Review Article Single Cell Protein Production: A Review. In *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* (Vol. 4, Number 9). http://www.ijcmas.com

Tibbetts, S. M., Piercey, M. J., Patelakis, S. J. J., & Stratton, B. (2025). Single-cell protein (SCP) meals from Methylovorus menthalis as feed ingredients for freshwater Atlantic salmon (Salmo salar L.): Digestibility, growth performance, nutrient utilization, and fish health. *Aquaculture*, *598*. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741874

Timira, V., Meki, K., Li, Z., Lin, H., Xu, M., & Pramod, S. N. (2022). A comprehensive review on the application of novel disruption techniques for proteins release from microalgae. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 62, Number 16, pp. 4309–4325). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1873734

Tomás-Almenar, C., Larrán, A. M., de Mercado, E., Sanz-Calvo, M. A., Hernández, D., Riaño, B., & García-González, M. C. (2018). Scenedesmus almeriensis from an integrated system waste-nutrient, as sustainable protein source for feed to rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Aquaculture*, *497*, 422–430. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.08.011

Ugbogu, E. A., & Ugbogu, O. C. (2016). A REVIEW OF MICROBIAL PROTEIN PRODUCTION: PROSPECTS AND CHALLENGES. In *FUW Trends in Science & Technology Journal ftstjournal@gmail.com April* (Vol. 1, Number 1).

Upcraft, T., Tu, W. C., Johnson, R., Finnigan, T., Van Hung, N., Hallett, J., & Guo, M. (2021). Protein from renewable resources: Mycoprotein production from agricultural residues. *Green Chemistry*, *23*(14), 5150–5165. https://doi.org/10.1039/d1gc01021b

Uwineza, C., Parchami, M., Bouzarjomehr, M., Taherzadeh, M. J., & Mahboubi, A. (2024). Recent Developments in the Application of Filamentous Fungus Aspergillus oryzae in Ruminant Feed. In *Animals* (Vol. 14, Number 16). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/ani14162427

Venkataraman, L. V, Beckerx, E., & Shamala, T. R. (1977). STUDIES ON TSS CULTIVATION AND UTILISATION OF TIU; ALGA SCENEDESliUB ACUTUS AS A SINGLE CELL PROTEIN. In *Life Sciences* (Vol. 20).

Vethathirri, R. S., Santillan, E., & Wuertz, S. (2021). Microbial community-based protein production from wastewater for animal feed applications. In *Bioresource Technology* (Vol. 341). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125723

Villa, A. F., Meléndez, A. P., Carulla, J. E., Pabón, M. L., & Cárdenas, E. A. (n.d.). *Estudio microbiológico y calidad nutricional del ensilaje de maíz en dos ecorregiones de Colombia ¤ Study of microbiological and nutritional quality of corn silage in two Colombian ecosystems Estudo microbiológico e qualidade nutricional da silagem de milho nas duas eco-regiões da Colômbia*. Retrieved http://rccp.udea.edu.co

Wu, J., Hu, J., Zhao, S., He, M., Hu, G., Ge, X., & Peng, N. (2018). Single-cell Protein and Xylitol Production by a Novel Yeast Strain Candida intermedia FL023 from Lignocellulosic Hydrolysates and Xylose. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *185*(1), 163–178. https://doi.org/10.1007/s12010-017-2644-8

Yi, Y., Li, J., Zhou, P., Jia, F., Chen, Y., & Li, D. (2024). Production of single cell protein rich in potassium by Nectaromyces rattus using biogas slurry and molasses. *Journal of Environmental Management*, *350*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119627

Yu, M. han, Li, X. shan, Wang, J., Longshaw, M., Song, K., Wang, L., Zhang, C. xiao, & Lu, K. le. (2023). Substituting fish meal with a bacteria protein (Methylococcus capsulatus, Bath) grown on natural gas: Effects on growth non-specific immunity and gut health of spotted seabass (Lateolabrax maculatus). *Animal Feed Science and Technology*, *296*. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115556

Zaki, M., & Said, S. D. (2018). Trichoderma Reesei single cell protein production from rice straw pulp in solid state fermentation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *345*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/345/1/012043

Zepka, L. Q., Jacob-Lopes, E., Goldbeck, R., Souza-Soares, L. A., & Queiroz, M. I. (2010). Nutritional evaluation of single-cell protein produced by Aphanothece microscopica Nägeli. *Bioresource Technology*, *101*(18), 7107–7111. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.001

Zhang, Z., Chen, X., & Gao, L. (2024). New strategy for the biosynthesis of alternative feed protein: Single-cell protein production from straw-based biomass. In *GCB Bioenergy* (Vol. 16, Number 2). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1111/gcbb.13120

9. ANEXOS

9.1. METODOLOGÍA

La presente monografía se desarrolló mediante una revisión documental y bibliográfica, basada en la recopilación, selección y análisis crítico de artículos científicos, revisiones y reportes producidos y publicados en el periodo comprendido entre 2010 y 2026. Este proceso relacionó el uso de microorganismos como fuente de proteína unicelular (Single Cell Protein, SCP) para la suplementación pecuaria, lo que aseguró la inclusión de información actualizada y relevante para el correcto desarrollo y comprensión del tema. El estudio tuvo como objetivo integrar los fundamentos nutricionales y productivos de la SCP, así como sus aplicaciones de aquel momento y sus potenciales usos futuros en la nutrición animal.

La búsqueda de información se realizó en bases de datos científicas que garantizaron la calidad, confiabilidad y validez de la información, tales como ScienceDirect (Elsevier), PubMed, Scopus, Google Scholar y SpringerLink. Dicha búsqueda se ejecutó utilizando palabras clave y combinaciones en español e inglés, incluyendo términos como *“Single cell protein”*, *“SCP”*, *“Microbial biomass”*, *“Livestock supplementation”*, *“Yeasts”*, *“Bacteria”*, *“Fungi”* y *“Algae”*.

Las fuentes bibliográficas empleadas fueron citadas mediante las normas APA 7ma edición, lo que garantizó el rigor académico, la honestidad intelectual y la prevención del plagio. Con base en esta información, el trabajo se estructuró sintetizando los aspectos clave de la producción de SCP para la suplementación animal; se centró en su obtención a partir de microorganismos y examinó tanto su calidad nutricional como su impacto en la alimentación animal. A través de este análisis, se identificaron las aplicaciones por especie y los principales desafíos económicos y ambientales de esta tecnología en el sector agropecuario.

10. TABLAS

Tabla 1. Contenido proteico y aplicaciones de SCP de bacterias propagadas en diferentes sustratos.

Especie	Sustrato	Contenido proteico %	Ejemplo de aplicación
Methylococcus capsulatus	Metano	73,5%	Sustitución de la harina de pescado por una proteína bacteriana (*Methylococcus capsulatus*, Bath) cultivada con gas natural: Efectos sobre el crecimiento, la inmunidad inespecífica y la salud intestinal de la lubina moteada (*Lateolabrax maculatus*). (Yu et al., 2023)
Bacillus subtilis PW12	Proteína de soja, como harina de soja desgrasada y cuajada de soja.	1,429% ± 0,023%	Optimización de la producción de biomasa de *Bacillus subtilis PW12* mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM): un estudio preliminar para la producción de proteína unicelular en acuicultura. (Gracious & Nandakumar, 2025)
Methylovorus menthalis	Metanol	70,6% - 81,4%	Harinas de proteína unicelular (SCP) de *Methylovorus menthalis* como ingredientes para piensos de salmón atlántico de agua dulce (*Salmo salar L.*): Digestibilidad, rendimiento del

			crecimiento, utilización de nutrientes y salud de los peces. (Tibbetts et al., 2025)
Pseudomonas aeruginosa	Residuos de hidrocarburos (Aceite de motor usado)	27,3%	Determinación de las condiciones óptimas para la producción de proteína unicelular (SCP) por la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* utilizando residuos de hidrocarburos (aceite de motor usado). (Safafar et al., 2016)
Escherichia coli	Hidrolizado de cuerno de carnero	66%	Producción de proteínas unicelulares a partir de hidrolizado de cuerno de carnero mediante bacterias. (Kurbanoglu & Algur, 2002)
Cupriavidus necator	Glicerol de grado reactivo, aceite de Jatropha, aceite de ricino, glicerol residual de aceite de fritura usado y subproductos de biodiésel derivados de aceite de palma y suero de leche.	74%	Aplicación potencial de *Cupriavidus necator* como productor de polihidroxialcanoatos y proteína unicelular: una revisión de las perspectivas científicas, culturales y religiosas. (Chee et al., 2019)
Streptomyces tuirus OS1	Lodo de la industria papelera y su pulpa.	78,79%	Una estrategia viable de biorremediación para el tratamiento de efluentes de la industria papelera y de la pulpa, y

			evaluación de la viabilidad de la biomasa bacteriana resultante como proteína unicelular (SCP) utilizando especies bacterianas autóctonas. (Khumchai et al., 2022)
Rhodococcus opacus PD630	Residuos de limón, residuos de naranja y efluente de rastrojo de maíz.	62,6 %	Producción de proteína unicelular a partir de residuos agrícolas utilizando *Rhodococcus opacus.* (Mahan et al., 2018)
Methylocystis parvus OBBP	Biogás crudo simulado	56,10 %	Nuevo enfoque para el biogás crudo: Producción de proteína unicelular mediante consorcios de bacterias metanooxidantes tolerantes al sulfuro. (Huang et al., 2024)
Cellulomonas biazotea	*Leptochloa fusca* (hierba Kaller)	60%	Producción de proteína unicelular mediante la fermentación de una gramínea perenne cultivada en suelos salinos con *Cellulomonas biazotea.* (Rajoka, 2005)

Tabla 2. Contenido proteico y aplicaciones de SCP de levaduras propagadas en diferentes sustratos.

Especie	Sustrato	Contenido proteico %	Ejemplo de aplicación
Saccharomyces cerevisiae	Cáscara de granada, residuos de mango, piel de plátano, cáscara de naranja, residuos de manzana	26,26% - 58,62%	Producción de proteína unicelular de *Saccharomyces cerevisiae* mediante el aprovechamiento de residuos frutales. (M. Khan et al., 2010)
Debaryomyces hansenii	Lodos de biogás y sustratos de carbono biodegradables	39,45 %	Producción eficiente de proteína unicelular a partir de lodos de biogás utilizando *Debaryomyces hansenii* tolerante a la sal y a los álcalis, previamente seleccionado. (K. Liu et al., 2024)
Candida utilis FMJ12	Residuos de mango	56,40%	Producción de proteína unicelular (SCP) y aminoácidos esenciales de *Candida utilis FMJ12* mediante fermentación en estado sólido, utilizando residuos de mango suplementados con fuentes de nitrógeno. (Marius et al., 2018)
Wickerhamomyces anomalus CCC32	Glicerol crudo	33%	Producción de proteínas de células individuales por *Wickerhamomyces*

			anomalus CCC32 utilizando glicerol crudo. (Silva et al., 2019)
Candida tropicalis	Hidrolizado hemicelulósico de bagazo de caña de azúcar	60,05%	*Candida tropicalis* capaz de producir proteína unicelular de levadura utilizando hidrolizado hemicelulósico de bagazo de caña de azúcar como fuente de carbono. (Magalhães et al., 2018)
Nectaromyces rattus	Lodo de biogás de estiércol de pollo y melaza de caña de azúcar	30%	Producción de proteína unicelular rica en potasio por *Nectaromyces rattus* utilizando lodo de biogás y melaza. (Yi et al., 2024)
Yarrowia lipolytica	Residuos de aceite de linaza, efluentes de aceite de palma + glicerol crudo, melaza de caña de azúcar + aceite de cocina usado + glicerol crudo.	48,2%, 20,2%, 54% respectivamente	Proteína sostenible para la alimentación animal mediante el cultivo de *Yarrowia lipolytica* en residuos y subproductos agroindustriales. (Patsios et al., 2020)
Kluyveromyces marxianus NS127	Maltosa, almidón de maíz, lactosa, glucosa, sacarosa o melaza y licor de maceración de maíz	37,50% - 58,06%	Explorando el potencial de fermentación de *Kluyveromyces marxianus* NS127 para la producción de proteínas unicelulares. (Dong et al., 2025)

Blastobotrys adeninivorans	Hidrolizado de madera de abeto + subproductos de pollo	49,5%	Producción y caracterización de levaduras cultivadas en medios compuestos de azúcares derivados del abeto e hidrolizados de proteínas procedentes de subproductos de pollo. (Lapeña et al., 2020)
Candida intermedia FL023	Paja de *Miscanthus sinensis,* hidrolizado de mazorca de maíz, urea y licor de maceración de maíz.	48,4%	Producción de proteína y xilitol en células individuales mediante una nueva cepa de levadura, *Candida intermedia* FL023, a partir de hidrolizados lignocelulósicos y xilosa. (Wu et al., 2018)

Tabla 3. Contenido proteico y aplicaciones de SCP de microalgas y cianobacterias propagadas en diferentes sustratos.

Especie	Sustrato	Contenido proteico %	Ejemplo de aplicación
Spirulina platensis	Efluentes de molinos de arroz	59,6%	Análisis bioquímico de *Spirulina platensis* (Proteína unicelular, SCP) en diferentes concentraciones de efluente de molino de arroz. (Manjula & Subasri, 2018)
Euglena gracilis	CO2 y luz solar	47%	Producción de proteína unicelular de *Euglena gracilis* y fijación de dióxido de carbono en un fotobiorreactor innovador. (Chae et al., 2006)
Scenedesmus almeriensis	Estiércol porcino	46,7%	*Scenedesmus almeriensis* procedente de un sistema integrado de residuos y nutrientes, como fuente de proteína sostenible para la alimentación de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). (Tomás-Almenar et al., 2018)
Chlorella pyrenoidosa	Agua de proceso industrial	65,2%	Mejora del contenido de proteínas y pigmentos en dos especies *de Chlorella* cultivadas en agua de proceso industrial. (Safafar et al., 2016)

Aphanothece microscopica Nägeli	Arroz precocido	45%	Evaluación nutricional de la proteína unicelular producida por *Aphanothece microscopica Nägeli*. (Zepka et al., 2010)
Galdieria sulphuraria	Dióxido de carbono atmosférico.	39,31% - 46,86%	Potencial de producción de proteínas a partir de células individuales con la microalga roja extremófila *Galdieria sulphuraria*: crecimiento y bioquímica Caracterización. (Montenegro-Herrera et al., 2022)
Scenedesmus obliquus BR003	Urea, monofosfato de amonio, cloruro de potasio, sulfato de magnesio heptahidratado y sulfato de hierro monohidratado.	33,9 ± 2,3 %	Extracción de proteínas de la microalga *Scenedesmus obliquus* BR003, seguida de la extracción de lípidos de la biomasa húmeda desproteinizada utilizando hexano y acetato de etilo. (Amorim et al., 2020)
Chlorella vulgaris Bey	Residuos líquidos de tapioca	56,17%	Crecimiento y potencial de producción de proteína unicelular (SCP) a partir de microalgas verdes (*Chlorella vulgaris* Bey) en residuos líquidos de tapioca. (Nineteen Fransiska, 2003)
Scenedesmus acutus	Dióxido de carbono (CO2) y melaza	38.10 – 40,50%	Estudios sobre el cultivo y la utilización del alga *Scenedesmus acutus* como proteína unicelular. (Venkataraman et al., 1977)

Spirulina platensis	Extracto de torta de filtración de remolacha azucarera	25% - 46,5%	Extracto de torta de filtración de la industria azucarera de remolacha como medio de cultivo económico para la producción de *Spirulina platensis* como fábrica de células microbianas para la producción de proteínas. (Saad et al., 2023)

Tabla 4. Contenido proteico y aplicaciones de SCP de hongos filamentosos propagados en diferentes sustratos.

Especie	Sustrato	Contenido proteico %	Ejemplo de aplicación
Aspergillus niger	Residuos de naranja dulce y pulpa de naranja	46,50 % - 52,48%	Extracción de proteína unicelular a partir de residuos de naranja mediante el aislado de *Aspergillus niger NO.5* mediante fermentación en estado sólido. (Alemu, 2014)
Rhizopus oligosporus	Arroz pulido	47,87%	Optimización de los parámetros de fermentación para una producción mejorada y de bajo costo de proteína unicelular a partir del pulido del arroz utilizando *Rhizopus oligosporus.* (Hassan Farooq et al., 2025)
Aspergillus oryzae	Residuos de la industria del etanol, agroindustriales, aguas residuales industriales y medios sintéticos	30% - 58,9%	Avances recientes en la aplicación del hongo filamentoso *Aspergillus oryzae* en la alimentación de rumiantes. (Uwineza et al., 2024)
Paradendryphiella salina	*Ulva* sp.	48%	Micoproteína y proteína similar a la hidrofobina producidas por hongos

			marinos *Paradendryphiella salina* en fermentación sumergida con algas verdes *Ulva* spp. (Landeta-Salgado et al., 2021)
Fusarium venenatum ATCC 20334	Jugo de dátil	46,48%	Metodología de superficie de respuesta para la producción de micoproteínas por *Fusarium venenatum ATCC 20334.* (Hosseini & Khosravi-Darani, 2011)
Aspergillus flavus NRRL21882	Cáscara de arveja, patata y plátano	60,67%, 51,10%, 35,24% respectivamente	Producción de proteína unicelular (SCP) a partir de los residuos de cáscara de arveja, papa y plátano por *Aspergillus flavus* NRRL21882 como un suplemento avícola orgánico eficiente. (A. R. Khan et al., 2024)
Paecilomyces variotii	Hidrolizado de residuos forestales (cortes finos de copas y ramas)	46,5%	La proteína unicelular de *Paecilomyces variotii* en la dieta favorece el crecimiento y la salud intestinal de la dorada. (Busti et al., 2026)
Penicillium janthinellum NCIM St-F-3b	Hemicelulosa de bagazo y sulfato de amonio	46%	Producción de proteína unicelular, aminoácidos esenciales y xilanasa por *Penicillium janthinellum* (Rao et al., 2010)
Mucor indicus	Bagazo de manzana	40 % - 54 %	Biorrefinería de orujo de manzana para la producción de etanol, micoproteína y productos bioquímicos de valor añadido

			mediante *Mucor indicus*. (Borujeni et al., 2022)
Trichoderma reesei	Pulpa de paja de arroz	25%	Producción de proteína unicelular de *Trichoderma reesei* a partir de pulpa de paja de arroz mediante fermentación en estado sólido. (Zaki & Said, 2018)

Tabla 5. Composición nutricional de los ingredientes de *P. variotii*, harina de pescado y concentrado de proteína de soja (SPC).

Nutrientes (g/kg MS)	***P. variotii***	**Harina de pescado**	**Concentrado de proteína de soja**
Materia seca	925,2	919,7	920,3
Proteína bruta	625,1	751,8	610,0
Lípidos brutos	7,5	77,0	15,1
Minerales (g/kg MS)			
Azufre	6,4	8,5	4,2
Fósforo	20,9	24,5	8,4
Calcio	12,5	46,2	4,1
Magnesio	0,9	2,7	4,1
Aminoácidos (g/kg MS)			
Lisina	33,8	54,8	27,4
Metionina	7,5	14,3	6,1
Treonina	19,9	25,3	22,0
Triptófano	5,3	5,8	6,5
Cisteína	3,3	5,1	7,2

Adaptado de: (Hooft et al., 2024)