

## **AZOLLA (*AZOLLA SPP.*) COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE A LA HARINA DE PESCADO EN DIETAS PARA POLLOS DE ENGORDE: DESEMPEÑO NUTRICIONAL Y FACTIBILIDAD ECONÓMICA**

## ***AZOLLA (*AZOLLA SPP.*) AS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE TO FISH MEAL IN BROILER DIETS: NUTRITIONAL PERFORMANCE AND ECONOMIC FEASIBILITY***

María Chamba-Ontaneda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Loja, Ecuador. Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Facultad de posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7934-8373>. Correo: [maria.n.chamba@unl.edu.ec](mailto:maria.n.chamba@unl.edu.ec)

Richard Cornejo-Cornejo<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Universidad Estatal del Sur de Manabí, Manabí, Ecuador. Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Facultad de posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. Magíster en Zootecnia con mención en Ganadería Sostenible. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5450-8609>. Correo: [richard.cornejo@unesum.edu.ec](mailto:richard.cornejo@unesum.edu.ec)

Bertha Alvarado-Pincay<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Facultad de posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2907-7689>. Correo: [balvaradop@uteq.edu.ec](mailto:balvaradop@uteq.edu.ec)

Iván González-Puetate<sup>4\*</sup>

<sup>4</sup> Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Fauna, Conservation and Global Health Research Group, Universidad Regional Amazónica Ikiam, Ecuador. Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Facultad de posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9930-0617>. Correo: [ivan.gonzalezp@ug.edu.ec](mailto:ivan.gonzalezp@ug.edu.ec)

**\* Autor para correspondencia: [ivan.gonzalezp@ug.edu.ec](mailto:ivan.gonzalezp@ug.edu.ec)**

## Resumen

El incremento del costo y del impacto ambiental de la harina de pescado ha impulsado la búsqueda de fuentes proteicas sostenibles para la alimentación avícola. En este contexto, la Azolla (*Azolla spp.*) se presenta como una alternativa prometedora debido a su rápido crecimiento, capacidad de fijación biológica de nitrógeno y bajo costo de producción. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño nutricional, técnico y económico de la Azolla como sustituto parcial de la harina de pescado en dietas para pollos de engorde, mediante una revisión narrativa con enfoque analítico y comparativo, basada en literatura científica indexada y datos técnicos publicados entre 2018 y 2025. Se analizaron variables relacionadas con la composición proximal, el perfil de aminoácidos, la digestibilidad, el desempeño productivo y la viabilidad económica. Los resultados evidenciaron que la harina de pescado presentó mayor concentración proteica, digestibilidad y equilibrio aminoacídico; sin embargo, la Azolla mostró ventajas potenciales relacionadas con la sostenibilidad ambiental, la disponibilidad local y la reducción de costos de producción. Asimismo, procesos como la fermentación, el secado y la extrusión pueden mejorar su valor nutricional y reducir la presencia de factores antinutricionales. Se concluye que la Azolla presenta potencial como fuente proteica complementaria en niveles moderados de inclusión, siempre que se garantice un adecuado balance nutricional, y puede contribuir al desarrollo de sistemas avícolas más sostenibles y económicamente viables.

**Palabras clave:** nutrición de pollos de engorde; producción avícola; proteína sostenible; sustitución de harina de pescado; viabilidad económica

## Abstract

*The increasing cost and environmental impact of fish meal have driven the search for sustainable protein sources for poultry nutrition. In this context, Azolla (*Azolla spp.*) represents a promising alternative due to its rapid growth, biological nitrogen fixation capacity, and low production cost. This study aimed to evaluate the nutritional, technical, and economic performance of Azolla as a partial substitute for fish meal in broiler diets through a narrative review with an analytical and comparative approach, based on indexed scientific literature and technical data published between 2018 and 2025. Variables related to proximate composition, amino acid profile, digestibility, growth performance, and economic feasibility were analyzed. The findings showed that fish meal had a higher protein concentration, greater digestibility, and a more balanced amino acid profile; however, Azolla showed potential advantages related to environmental sustainability, local availability, and reduced production costs. Furthermore, processing methods such as fermentation, drying, and extrusion may improve its nutritional value and reduce antinutritional factors. It is concluded that Azolla has potential as a complementary protein source at moderate inclusion levels, provided that an adequate nutritional balance is ensured, and may contribute to the development of more sustainable and economically viable poultry production systems.*

**Keywords:** Broiler chicken nutrition; poultry production; sustainable protein; fishmeal substitution; economic viability

**Fecha de recibido:** 22/05/2026

**Fecha de aceptado: 04/08/2026**

**Fecha de publicado: 18/08/2026**

## Introducción

La formulación de dietas de alto desempeño para pollos de engorde requiere la selección de fuentes proteicas que optimicen simultáneamente el valor nutricional, la digestibilidad, la eficiencia económica y la sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción (Barua et al., 2020). En la avicultura moderna, caracterizada por elevadas tasas de crecimiento y una alta eficiencia en la conversión alimenticia, el suministro adecuado de proteína y aminoácidos digestibles es determinante para maximizar el rendimiento productivo y la rentabilidad. En este contexto, la evaluación de fuentes proteicas convencionales y alternativas ha adquirido una importancia creciente, impulsada por la necesidad de desarrollar sistemas de alimentación más eficientes y sostenibles (Ravindran, 2021).

La harina de pescado es una de las principales fuentes proteicas utilizadas en la nutrición avícola debido a su elevado contenido de proteína, excelente perfil de aminoácidos esenciales y alta digestibilidad (Mugwanya et al., 2023). Sin embargo, el incremento de su costo, la dependencia de recursos marinos y las preocupaciones ambientales derivadas de su producción han impulsado la búsqueda de ingredientes alternativos que garanticen un adecuado aporte nutricional con un menor impacto ambiental (Tacon y Metian, 2015).

En este contexto, *Azolla spp.* ha adquirido interés como recurso alimenticio alternativo debido a su contenido de proteína, aminoácidos y compuestos bioactivos, así como a su potencial para disminuir la dependencia de ingredientes convencionales en alimentación animal (Md Nasir et al., 2022).

En este escenario, la *Azolla* (*Azolla spp.*), un helecho acuático de rápido crecimiento que mantiene una relación simbiótica con *Anabaena azollae*, ha emergido como una fuente proteica no convencional de interés para la alimentación animal (Nasir et al., 2022). Su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, producir grandes cantidades de biomasa en periodos cortos y desarrollarse en sistemas de bajo costo, incluso utilizando efluentes agrícolas, la convierten en una alternativa compatible con los principios de la economía circular y la producción pecuaria sostenible (Yao et al., 2018).

No obstante, la utilización de *Azolla* en dietas para pollos de engorde presenta desafíos nutricionales asociados a su menor concentración de proteína, mayor contenido de fibra estructural, presencia de factores antinutricionales y menor digestibilidad en comparación con la harina de pescado (Samad et al., 2020). Estas limitaciones pueden afectar el aprovechamiento de los nutrientes y el desempeño productivo cuando se incorpora en niveles elevados, por lo que su uso requiere estrategias de procesamiento y una formulación nutricional adecuada para maximizar su valor alimenticio (Dhumal et al., 2020).

En este contexto, resulta necesario realizar una evaluación integral que compare el valor nutricional, la digestibilidad, la viabilidad económica y el potencial de sostenibilidad de la *Azolla* frente a la harina de pescado como fuentes proteicas para pollos de engorde. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial de *Azolla* (*Azolla spp.*) como una alternativa sostenible a la harina de pescado, mediante un análisis comparativo de su composición nutricional, perfil de aminoácidos, digestibilidad, viabilidad económica y posible aplicación en la formulación de dietas para pollos de engorde.

## Materiales y métodos

El presente estudio se desarrolló mediante revisión narrativa con enfoque analítico y comparativo, orientada a evaluar el potencial de Azolla (*Azolla spp.*) como fuente proteica sostenible y alternativa parcial a la harina de pescado en dietas para pollos de engorde. La metodología comprendió la recopilación, organización y análisis crítico de evidencia científica relacionada con la composición nutricional, perfil de aminoácidos, digestibilidad, desempeño productivo y viabilidad económica de ambas fuentes proteicas.

La búsqueda bibliográfica se realizó en Scopus, ScienceDirect, Web of Science, PubMed y Google Scholar, considerando publicaciones comprendidas entre 2018 y 2025. Se emplearon combinaciones de términos relacionados con Azolla, harina de pescado, nutrición de pollos de engorde, fuentes proteicas alternativas, digestibilidad, aminoácidos, desempeño productivo y viabilidad económica, utilizando operadores booleanos AND y OR según las características de cada base de datos. Se incluyeron artículos originales, revisiones y documentos técnicos que aportaran información cuantitativa sobre composición proximal, digestibilidad aparente e ileal, aminoácidos esenciales, energía metabolizable, retención de nitrógeno y parámetros productivos. Se excluyeron documentos duplicados, publicaciones sin información suficiente para interpretar los resultados y estudios no relacionados directamente con las variables definidas para la comparación.

La información seleccionada se organizó en matrices comparativas para integrar las diferencias nutricionales, técnicas y económicas entre ambas fuentes proteicas. Se analizaron variables como proteína bruta, extracto etéreo, fibra, minerales, energía metabolizable, digestibilidad, perfil de aminoácidos esenciales y costo por unidad de proteína. Cuando los estudios presentaron resultados heterogéneos, se consideraron diferencias relacionadas con la especie de Azolla, condiciones de producción, procesamiento, nivel de inclusión y metodología utilizada para la determinación de las variables.

Para el componente económico se integraron datos reportados en la literatura científica, valores de referencia del mercado y estimaciones propias. Los costos de producción y procesamiento de Azolla se estimaron considerando infraestructura, insumos, mano de obra, deshidratación, almacenamiento y control de calidad, mientras que para la harina de pescado se emplearon precios internacionales y valores de comercialización correspondientes al periodo analizado. A partir de esta información se calcularon indicadores comparativos, entre ellos el costo por kilogramo de proteína cruda y de proteína digestible.

Los valores derivados de cálculos propios fueron considerados estimaciones referenciales y no costos observados experimentalmente, por lo que se utilizaron únicamente para construir escenarios comparativos de viabilidad económica. Estos escenarios consideraron las diferencias en concentración proteica, digestibilidad, procesamiento y requerimientos de suplementación con aminoácidos. Finalmente, la evidencia se interpretó de manera integrada, considerando el valor nutricional, la eficiencia de utilización de los nutrientes, el costo y el potencial de Azolla para reducir parcialmente la dependencia de fuentes proteicas convencionales.

## Resultados y discusión

La evaluación comparativa entre la Azolla (*Azolla spp.*) y la harina de pescado como fuentes proteicas para la alimentación de pollos de engorde evidencia diferencias importantes en su composición nutricional, digestibilidad, perfil de aminoácidos y viabilidad económica. Estas características constituyen criterios

fundamentales para la formulación de dietas balanceadas, ya que influyen directamente en el desempeño productivo, la eficiencia en la utilización de los nutrientes y la sostenibilidad de los sistemas de producción avícola.

### Composición nutricional

La composición proximal de ambos ingredientes muestra diferencias relevantes, particularmente en el contenido de proteína bruta, energía metabolizable y fibra. Estas variaciones determinan su valor nutricional y condicionan su nivel de inclusión en las dietas para pollos de engorde, en función de los requerimientos nutricionales y de los objetivos productivos.

La composición química de Azolla puede variar entre especies y condiciones de cultivo. Md Nasir et al. (2022) reportaron concentraciones de proteína cercanas al 21–26 % de la materia seca, lo que confirma su potencial proteico, aunque también evidencia la necesidad de considerar la variabilidad de la biomasa al establecer matrices nutricionales para formulación.

**Tabla 1.** Composición proximal comparativa de la Azolla y la harina de pescado (base de materia seca).

| Nutriente                       | Azolla ( <i>A. filiculoides</i> )    | Harina de Pescado (Peruana, Standard) | Diferencia Relativa  | Referencias                              |
|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------------------------------|
| Materia Seca (%)                | 8-12 (fresca) / 90-92 (deshidratada) | 90-92                                 | -                    | Stambouli et al., 2020                   |
| Proteína Cruda (%)              | 19.8-28.5                            | 64.5-72.0                             | +152% harina pescado | Tacon y Metian, 2015                     |
| Extracto Etéreo (%)             | 2.8-5.2                              | 8.5-12.0                              | +115% harina pescado | Dhumal et al., 2020                      |
| Fibra Cruda (%)                 | 11.5-18.2                            | 0.5-1.2                               | +1317% Azolla        | Rawat et al., 2022; Feedipedia, 2020     |
| Cenizas (%)                     | 10.2-16.8                            | 14.5-22.0                             | +28% harina pescado  | Tacon y Metian, 2015                     |
| Extracto Libre de Nitrógeno (%) | 38.5-45.0                            | 2.0-5.5                               | +708% Azolla         | Calculado por diferencia                 |
| Energía Metabolizable (kcal/kg) | 1,850-2,150                          | 2,850-3,200                           | +45% harina pescado  | Stambouli et al., 2020                   |
| Calcio (%)                      | 0.8-1.4                              | 3.5-6.0                               | +329% harina pescado | Dhumal et al., 2020                      |
| Fósforo Disponible (%)          | 0.2-0.4                              | 1.8-2.5                               | +525% harina pescado | Rawat et al., 2022; Tacon y Metian, 2015 |

La Tabla 1 muestra diferencias importantes en la composición nutricional de Azolla y la harina de pescado. Los valores recopilados de Stambouli et al. (2020), Dhumal et al. (2020) y Rawat et al. (2022) indican que Azolla aporta nutrientes de interés para la alimentación animal, aunque presenta menor densidad proteica y energética y un contenido considerablemente mayor de fibra. Para la harina de pescado, los valores considerados en la comparación proceden principalmente de Tacon y Metian (2015) y Feedipedia (2020). Estas diferencias son relevantes en pollos de engorde, debido a que la concentración de proteína y energía

determina en gran medida la cantidad de ingrediente necesaria para satisfacer los requerimientos nutricionales, mientras que un mayor contenido de fibra puede limitar su aprovechamiento.

A partir de los valores recopilados se calcularon las diferencias relativas entre ambos ingredientes, lo que permitió dimensionar mejor las variaciones observadas. La harina de pescado presentó aproximadamente 152 % más proteína cruda y alrededor de 45 % más energía metabolizable, mientras que Azolla mostró una diferencia considerablemente mayor en el contenido de fibra. Estos cálculos propios complementan la comparación descriptiva y permiten observar que las diferencias entre las fuentes no se limitan a la concentración de proteína, sino que involucran también características que pueden modificar la densidad y el aprovechamiento nutricional de la dieta.

Esta interpretación coincide con lo señalado por Samad et al. (2020), referencia utilizada en el manuscrito para sustentar que la menor concentración proteica, el mayor contenido de fibra y la menor digestibilidad constituyen limitaciones para la utilización de Azolla en pollos de engorde. En este sentido, las diferencias observadas muestran que Azolla y la harina de pescado no pueden considerarse nutricionalmente equivalentes. Más que plantear una sustitución directa entre ingredientes, los resultados orientan hacia una incorporación de Azolla basada en su contribución al balance global de proteína, energía y fibra de la dieta.

### Perfil de aminoácidos

El perfil de aminoácidos esenciales constituye uno de los principales criterios para evaluar la calidad nutricional de una fuente proteica. Los resultados muestran que la harina de pescado posee un perfil aminoacídico más equilibrado y una mayor digestibilidad ileal que la Azolla, destacándose por sus mayores concentraciones de lisina y metionina, aminoácidos esenciales para el crecimiento y la eficiencia productiva de los pollos de engorde.

Por su parte, la Azolla presenta deficiencias en aminoácidos esenciales, particularmente lisina (déficit aproximado del 39 %) y metionina + cistina (déficit de hasta el 45 %), lo que hace necesaria la suplementación con aminoácidos cristalinos para satisfacer los requerimientos nutricionales de las aves (Rawat et al., 2022). En consecuencia, la evidencia disponible sugiere que la Azolla debe considerarse como un ingrediente proteico complementario y no como una fuente exclusiva de proteína en dietas balanceadas para pollos de engorde.

**Tabla 2.** Perfil de aminoácidos esenciales y digestibilidad ileal en pollos de engorde.

| Aminoácido | Azolla  | Digestibilidad de Azolla (%) | Harina de pescado | Digestibilidad HP (%) | Requerimiento Pollo (g/100g PC)* | Índice de Cobertura a Azolla** | Índice de Cobertura HP** | Referencias            |
|------------|---------|------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------|
| Metionina  | 1.4-2.0 | 72-78                        | 2.8-3.2           | 90-93                 | 3.2                              | 0.50                           | 0.94                     | Rawat et al., 2022     |
| Met+Cis    | 2.8-3.8 | 70-76                        | 4.5-5.2           | 88-91                 | 5.8                              | 0.55                           | 0.84                     | Stambouli et al., 2020 |
| Treonina   | 3.9-4.8 | 65-72                        | 4.2-4.8           | 89-92                 | 4.8                              | 0.75                           | 0.95                     | Dhumal et al., 2020    |

Azolla (*Azolla spp.*) como alternativa sostenible a la harina de pescado en dietas para pollos de engorde

|              |         |       |         |       |     |      |      |                                              |
|--------------|---------|-------|---------|-------|-----|------|------|----------------------------------------------|
| Triptófano   | 1.0-1.4 | 63-70 | 1.0-1.3 | 87-90 | 1.2 | 0.88 | 1.00 | Tacon y Metian, 2015                         |
| Arginina     | 5.2-6.8 | 78-84 | 5.8-6.5 | 93-96 | 6.5 | 0.92 | 0.96 | Rawat et al., 2022                           |
| Valina       | 4.8-5.6 | 68-74 | 5.2-5.8 | 89-92 | 5.0 | 0.98 | 1.10 | Stambouli et al., 2020                       |
| Isoleucina   | 3.5-4.3 | 66-73 | 4.2-4.8 | 90-93 | 4.2 | 0.88 | 1.05 | Dhumal et al., 2020                          |
| Fenilalanina | 4.0-4.9 | 69-75 | 3.8-4.3 | 88-91 | 4.5 | 0.95 | 0.91 | Rawat et al., 2022                           |
| Histidina    | 1.8-2.4 | 71-77 | 2.2-2.8 | 89-92 | 2.2 | 0.95 | 1.14 | Stambouli et al., 2020; Tacon y Metian, 2015 |

\* Requerimientos para pollos de engorde fase crecimiento (14-28 días), proteína ideal (NRC, 1994).

\*\* Índice de Cobertura = (Contenido AA en ingrediente × Digestibilidad) / Requerimiento. Valores <1.0 indican limitación.

La Tabla 2 amplía la comparación nutricional al considerar el perfil de aminoácidos esenciales y su digestibilidad. Los valores integrados de Rawat et al. (2022), Stambouli et al. (2020), Dhumal et al. (2020) y Tacon y Metian (2015) muestran diferencias entre Azolla y la harina de pescado tanto en la concentración como en la disponibilidad de los aminoácidos evaluados. Este aspecto es particularmente importante porque la calidad de una fuente proteica no depende exclusivamente de la cantidad total de proteína, sino también de su capacidad para aportar aminoácidos esenciales en cantidades adecuadas y potencialmente aprovechables.

Con el propósito de integrar estas variables se calculó un índice teórico de cobertura aminoacídica, relacionando el contenido de cada aminoácido, su digestibilidad y el requerimiento empleado como referencia. Este indicador constituye un cálculo propio del estudio y permite interpretar de forma conjunta la concentración y la disponibilidad de los aminoácidos. En Azolla, los menores índices correspondieron a metionina (0,50), metionina + cistina (0,55) y treonina (0,75), mientras que la harina de pescado alcanzó valores próximos o superiores a 1,0 para varios de los aminoácidos considerados.

Los resultados ayudan a comprender que un ingrediente puede presentar un contenido apreciable de proteína y, al mismo tiempo, mostrar limitaciones en la cobertura de determinados aminoácidos esenciales. Desde esta perspectiva, el principal desafío nutricional de Azolla no se restringe a su menor concentración proteica, sino también al equilibrio y disponibilidad de sus aminoácidos. Los índices calculados identifican especialmente a los aminoácidos azufrados como puntos críticos, lo que sugiere que su inclusión debe acompañarse de una formulación que considere aminoácidos digestibles y, cuando sea necesario, la complementación con otras fuentes proteicas o aminoácidos cristalinos.

### Digestibilidad de los nutrientes

La digestibilidad de los nutrientes es un factor determinante para la eficiencia de utilización de los ingredientes en la alimentación de pollos de engorde. Como se presenta en la Tabla 3, la harina de pescado exhibe coeficientes de digestibilidad superiores para proteína, energía y lípidos, alcanzando valores superiores al 90 % para la proteína digestible. Estas características favorecen una mayor disponibilidad de nutrientes y un mejor aprovechamiento de la dieta, lo que contribuye al desempeño productivo de las aves (Stambouli et al., 2020).

**Tabla 3.** Coeficientes de digestibilidad aparente e ideal en pollos de engorde.

| Parámetro                          | Azolla<br>(Deshidratada) | Harina de<br>Pescado | Metodología                                   | Referencias                              |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Digestibilidad Proteína Cruda (%)  | 62.5-71.8                | 89.5-93.2            | Digestibilidad aparente total (excreta)       | Dhumal et al., 2020; Rawat et al., 2022  |
| Digestibilidad Ileal Proteína (%)  | 68.2-76.5                | 91.8-95.2            | Método de sacrificio + titanio                | Stambouli et al., 2020                   |
| Digestibilidad Extracto Etéreo (%) | 68.5-75.0                | 88.0-94.5            | Hidrólisis ácida + extracción Soxhlet         | Rawat et al., 2022; Tacon y Metian, 2015 |
| Digestibilidad Fibra Cruda (%)     | 12.5-18.2                | N/A (<1% FC)         | Método gravimétrico (Weende)                  | Dhumal et al., 2020                      |
| Retención Nitrógeno (%)*           | 48.5-56.8                | 72.5-78.2            | Balance metabólico (N ingerido - N excretado) | Stambouli et al., 2020                   |

\* Retención de nitrógeno =  $[(N \text{ ingerido} - N \text{ excretado}) / N \text{ ingerido}] \times 100$ .

La Tabla 3 permite valorar la proporción de los nutrientes que potencialmente puede ser aprovechada por el animal. Los datos integrados de Dhumal et al. (2020) y Rawat et al. (2022) muestran que la digestibilidad aparente de la proteína de Azolla se encuentra entre 62,5 y 71,8 %, mientras que para la harina de pescado alcanza valores entre 89,5 y 93,2 %. Una tendencia similar se observa en la digestibilidad ileal de la proteína, cuyos valores son superiores para la harina de pescado. Stambouli et al. (2020) sustenta en la tabla los valores utilizados para digestibilidad ileal y retención de nitrógeno, mientras que Rawat et al. (2022) y Tacon y Metian (2015) aparecen asociados con la comparación del extracto etéreo.

Como parte del análisis se incorporó la retención de nitrógeno, expresada mediante la relación entre el nitrógeno ingerido y el excretado. Los valores considerados fueron de 48,5–56,8 % para Azolla y de 72,5–78,2 % para la harina de pescado. Esta comparación complementa el contenido de proteína cruda y permite aproximarse mejor a la eficiencia con la que el nitrógeno ingerido puede ser retenido por el organismo.

La menor utilización de los nutrientes de Azolla se relaciona en el manuscrito con su contenido de fibra y con la presencia de factores antinutricionales. En este sentido, Dhumal et al. (2020) son citados para señalar la presencia de taninos, ácido oxálico e inhibidores de tripsina como posibles factores que limitan la digestión y absorción de nutrientes. En conjunto, estos resultados muestran que valorar Azolla únicamente por su porcentaje de proteína cruda puede sobreestimar su contribución nutricional. La menor digestibilidad y retención de nitrógeno hacen necesario considerar simultáneamente cuánto nutriente contiene el ingrediente y qué proporción puede ser efectivamente aprovechada por el ave.

### Análisis económico

El componente económico se desarrolló mediante escenarios comparativos de carácter referencial, contruidos a partir de información reportada en la literatura científica y valores de referencia disponibles para los ingredientes evaluados. Para Azolla se consideraron los principales componentes asociados con su producción y procesamiento, incluyendo infraestructura, insumos, mano de obra, deshidratación, almacenamiento y control de calidad. Para la harina de pescado se utilizaron valores referenciales correspondientes al periodo analizado. A partir de esta información se estimaron el costo por kilogramo de

proteína cruda y el costo por kilogramo de proteína digestible. Los valores obtenidos representan escenarios teóricos de comparación y no costos determinados experimentalmente ni precios comerciales directamente observados; por tanto, su interpretación se limitó a evaluar tendencias relativas de viabilidad económica entre ambas fuentes proteicas.

**Tabla 4.** Efecto de diferentes métodos de procesamiento sobre la digestibilidad proteica, los factores antinutricionales y el costo relativo de Azolla.

| Método de Procesamiento  | Temperatura /Tiempo | Digestibilidad Proteína (%) | Retención FAN (%) | Costo Relativo* | Referencias            |
|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|
| Sin tratamiento (fresca) | -                   | 58.2±3.1                    | 100               | 1.0             | Dhumal et al., 2020    |
| Secado solar             | 35-40°C / 48-72 h   | 62.5±2.8                    | 95-98             | 1.2             | Rawat et al., 2022     |
| Secado mecánico          | 60°C / 6-8 h        | 68.2±2.5                    | 85-90             | 2.5             | Stambouli et al., 2020 |
| Tratamiento térmico      | 80°C / 15 min       | 73.5±2.9                    | 40-50             | 3.2             | Dhumal et al., 2020    |

FAN: factores antinutricionales. \*Costo relativo respecto a la Azolla sin tratamiento, considerada como base = 1,0. Los valores representan diferencias relativas asociadas al requerimiento de energía, tiempo y equipamiento y no corresponden a costos monetarios expresados en USD/TM.

La Tabla 4 muestra cómo diferentes métodos de procesamiento pueden modificar el aprovechamiento nutricional de Azolla. Los valores recopilados de Dhumal et al. (2020), Rawat et al. (2022) y Stambouli et al. (2020) evidencian un incremento progresivo de la digestibilidad proteica, desde 58,2 % en el material fresco hasta 62,5 % con secado solar, 68,2 % mediante secado mecánico y 73,5 % después del tratamiento térmico. Paralelamente, la retención de factores antinutricionales disminuye desde el valor de referencia de 100 % en el material sin tratamiento hasta 40–50 % con el tratamiento térmico.

Para complementar la comparación nutricional se incorporó un índice de costo relativo calculado por los autores, utilizando como referencia un valor de 1,0 para Azolla sin tratamiento. El índice aumentó a 1,2 con secado solar, 2,5 con secado mecánico y 3,2 con tratamiento térmico. Estos valores no representan costos monetarios en USD/TM, sino diferencias relativas asociadas con los requerimientos de energía, tiempo y equipamiento de cada procedimiento.

La integración de ambos componentes permite observar un aspecto práctico: el incremento de la calidad nutricional tiene asociado un mayor esfuerzo de procesamiento. Aunque el tratamiento térmico presenta la mayor digestibilidad y la menor retención de factores antinutricionales dentro de los valores considerados, también registra el mayor índice relativo. De esta manera, la elección del procesamiento no debería orientarse necesariamente hacia el tratamiento más intenso, sino hacia aquel que permita obtener una mejora nutricional suficiente sin perder la ventaja económica buscada con el uso de Azolla. En sistemas con disponibilidad de radiación solar y recursos tecnológicos limitados, por ejemplo, el secado solar podría representar una alternativa de interés, aunque su mejora nutricional sea menor que la alcanzada con tratamientos de mayor intensidad.

### Sostenibilidad ambiental y economía circular

Desde una perspectiva de valorización, la viabilidad de Azolla no depende exclusivamente del costo por unidad de proteína. Su aprovechamiento puede integrarse dentro de esquemas de economía circular

considerando simultáneamente criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales, incluyendo su uso directo como alimento para ganado y aves (Nikkhah et al., 2024).

La producción de biomasa de Azolla también puede integrarse con procesos de recuperación de nutrientes y tratamiento de efluentes agropecuarios. En condiciones experimentales, *A. microphylla* cultivada en aguas residuales avícolas alcanzó una tasa máxima de secuestro de 1,38 g de CO<sub>2</sub> por gramo de biomasa seca, junto con reducciones importantes de contaminantes orgánicos del agua (Nyein & Iwai, 2025).

No obstante, los beneficios ambientales asociados con Azolla dependen del contexto productivo. En sistemas arroceros, su interacción con biochar redujo las emisiones de N<sub>2</sub>O, aunque se observaron incrementos transitorios de CH<sub>4</sub> durante etapas tempranas del cultivo, evidenciando que los efectos ambientales deben evaluarse mediante un enfoque integral y específico del sistema (Kimani et al., 2020).

Además, evidencias recientes muestran que la biomasa de Azolla puede participar en estrategias de valorización de residuos orgánicos, modificando la dinámica microbiana, la degradación de materia orgánica y el ciclaje de nutrientes, lo que amplía su potencial dentro de modelos de bioeconomía circular (Chakraborty et al., 2026).

### Viabilidad técnica en dietas de alto rendimiento

La formulación de dietas de alto rendimiento requiere considerar criterios nutricionales y tecnológicos como la densidad energética, el equilibrio de aminoácidos esenciales, la digestibilidad y la disponibilidad de nutrientes. La matriz de evaluación presentada en la Tabla 5 muestra que la harina de pescado obtuvo una mayor valoración técnica en la mayoría de los criterios analizados, debido a su elevado contenido proteico, alta digestibilidad y perfil aminoacídico equilibrado.

No obstante, la Azolla constituye una alternativa con alto potencial para sistemas de producción orientados a la sostenibilidad. Su utilización en niveles moderados de inclusión, junto con estrategias de procesamiento y suplementación con aminoácidos esenciales, permite mejorar su valor nutricional y ampliar su aplicabilidad como ingrediente funcional en la alimentación de pollos de engorde.

**Tabla 5.** Escenario económico referencial para la comparación de Azolla deshidratada y harina de pescado como fuentes proteicas.

| Concepto                                               | Azolla Deshidratada     | Harina de Pescado (65% PC) | Notas/Referencias                          |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|
| Precio FOB Mercado Internacional                       | N/A (no comercializada) | 1,450-1,850                | IndexMundi, 2024; Tacon y Metian, 2015     |
| Precio CIF Puerto Ecuador                              | -                       | 1,580-1,920                | Incluye flete y seguro (+9%)               |
| Aranceles e Impuestos                                  | -                       | 142-173                    | 9% arancel + impuestos                     |
| Precio Desaduanado Guayaquil                           | -                       | 1,722-2,093                | Base para comparación                      |
| <b>Costo de Producción Azolla (Cultivo Intensivo):</b> |                         |                            |                                            |
| • Infraestructura estanques (depreciación)             | 45                      | -                          | Amortización 10 años, Brouwer et al., 2018 |
| • Insumos (inoculación, fertilizantes P-K)             | 85                      | -                          | Yao et al., 2020                           |
| • Mano de obra (cosecha/manejo)                        | 120                     | -                          | Salario mínimo Ecuador 2024                |
| • Deshidratación mecánica (60°C)                       | 180                     | -                          | Energía + equipamiento                     |

Azolla (*Azolla spp.*) como alternativa sostenible a la harina de pescado en dietas para pollos de engorde

|                                                                                  |                         |             |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------------|
| • Empaque y almacenamiento                                                       | 35                      | -           | Sacos polipropileno + bodegaje       |
| • Control calidad y análisis                                                     | 25                      | -           | Laboratorio acreditado               |
| <b>Costo estimado del escenario de producción de <i>Azolla</i> deshidratada:</b> | <b>490 USD/TM de MS</b> | -           | Base seca, rendimiento 15 TM/ha/año  |
| Precio Mayorista Local (HP)                                                      | -                       | 1,850-2,200 | Distribuidores Guayaquil/Quito, 2024 |
| <b>Costo por kg Proteína Cruda:</b>                                              |                         |             |                                      |
| • Azolla (24% PC promedio)                                                       | 2.04                    | -           | 490 USD/TM ÷ 0.24 = 2,041 USD/TM PC  |
| • Harina Pescado (65% PC)                                                        | 2.85-3.38               | -           | 1,850-2,200 USD/TM ÷ 0.65            |
| <b>Costo por kg Proteína Digestible:</b>                                         |                         |             |                                      |
| • Azolla (digestibilidad 70%)                                                    | 2.91                    | -           | 2,041 ÷ 0.70                         |
| • Harina Pescado (digestibilidad 92%)                                            | 3.10-3.67               | -           | Costo PC ÷ 0.92                      |

Nota: Los valores corresponden a estimaciones construidas a partir de información bibliográfica y supuestos técnicos utilizados con fines comparativos. No representan precios comerciales observados ni costos experimentales de producción.

La Tabla 5 incorpora el componente económico mediante un escenario referencial que compara *Azolla* deshidratada y harina de pescado no solamente por el costo del ingrediente, sino también por la cantidad y digestibilidad de la proteína aportada. Para construir este escenario se utilizaron datos y valores de referencia procedentes de IndexMundi (2024), Brouwer et al. (2018), Yao et al. (2020) y Tacon y Metian (2015), complementados con supuestos técnicos y estimaciones propias relacionadas con infraestructura, insumos, mano de obra, deshidratación, almacenamiento y control de calidad. El costo estimado del escenario de producción de *Azolla* deshidratada fue de 490 USD/TM de materia seca.

A partir de este valor se realizaron los cálculos económicos propios. Considerando una concentración promedio de 24 % de proteína cruda, se obtuvo un costo estimado de 2,04 USD/kg de proteína cruda. Cuando este valor se corrigió considerando una digestibilidad del 70 %, el costo aumentó a 2,91 USD/kg de proteína digestible. Para la harina de pescado, con 65 % de proteína cruda, los valores calculados fueron de 2,85–3,38 USD/kg de proteína cruda y 3,10–3,67 USD/kg de proteína digestible al incorporar una digestibilidad del 92 %.

Esta forma de expresar el costo permite una comparación más cercana al valor nutricional de los ingredientes. Si se considera únicamente el costo de producción o adquisición, *Azolla* parece presentar una ventaja amplia; sin embargo, parte de esta diferencia disminuye cuando se ajusta por la concentración y digestibilidad de la proteína. Aun así, dentro de los supuestos considerados, mantiene un costo potencialmente competitivo por unidad de proteína digestible. Por ello, la conveniencia económica de *Azolla* parece depender especialmente de la posibilidad de producir la biomasa localmente, controlar los costos de deshidratación y mantener una calidad nutricional relativamente estable. Estos resultados deben interpretarse como una aproximación comparativa y no como evidencia de superioridad económica bajo todas las condiciones productivas.

### Desempeño productivo y salud intestinal

La respuesta productiva de los pollos de engorde a la inclusión de *Azolla* depende del nivel de incorporación y de las características nutricionales del ingrediente. En pollos Ross 308, la inclusión de 5 % de harina de hoja de *Azolla* mostró resultados compatibles con el mantenimiento del desempeño productivo y favoreció determinados indicadores relacionados con el metabolismo proteico, mientras que niveles superiores no

necesariamente produjeron beneficios adicionales (Abdelatty et al., 2020). Estos resultados respaldan el uso de *Azolla* como ingrediente complementario en niveles moderados de inclusión.

**Tabla 6.** Escenarios teóricos de costo de fuentes proteicas y suplementación con aminoácidos en dietas para pollos de engorde.

| Escenario                      | Inclusión (%)           | Proteína Aportada (kg) | Costo Ingrediente (USD)      | Suplementación AA Requerida (USD)* | Costo Total Fuente Proteica (USD) | Costo/kg PC Aportada (USD) |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Dieta Control (Harina Pescado) | 5.0                     | 32.5 (65% × 50 kg)     | 92.50-110.00                 | 8.50 (Met)                         | 101.00-118.50                     | 3.11-3.65                  |
| Dieta Azolla Baja              | 10.0                    | 24.0 (24% × 100 kg)    | 49.00                        | 28.50 (Lys, Met, Thr)              | 77.50                             | 3.23                       |
| Dieta Azolla Alta              | 15.0                    | 36.0 (24% × 150 kg)    | 73.50                        | 42.00 (Lys, Met, Thr, Val)         | 115.50                            | 3.21                       |
| Dieta Mixta (HP + Azolla)      | 3.0 HP +<br>12.0 Azolla | 48.3 (19.5 + 28.8)     | 55.50 +<br>58.80 =<br>114.30 | 18.00 (Met, Lys)                   | 132.30                            | 2.74                       |

Nota: Los resultados representan escenarios comparativos derivados de los supuestos económicos y nutricionales establecidos en el estudio y no corresponden a dietas comerciales evaluadas experimentalmente. Precios de aminoácidos cristalinos (USD/kg): L-lisina HCl: 2,80; DL-metionina: 4,50; L-treonina: 5,20; L-valina: 12,50 (mercado internacional, 2024).

La Tabla 6 integra los componentes nutricionales y económicos mediante escenarios teóricos que consideran el nivel de inclusión de Azolla y harina de pescado, la cantidad de proteína aportada, el costo del ingrediente y la suplementación requerida con aminoácidos. Estos valores corresponden a cálculos propios contruidos a partir de los supuestos nutricionales y económicos establecidos en el estudio y, por tanto, no representan dietas comerciales evaluadas experimentalmente.

El escenario basado en harina de pescado presentó un costo estimado de 3,11–3,65 USD/kg de proteína aportada. Para Azolla al 10 y 15 %, los valores fueron de 3,23 y 3,21 USD/kg, respectivamente. La similitud entre ambos niveles muestra que incrementar la participación de Azolla no produce necesariamente una reducción proporcional del costo, debido a que también aumenta la necesidad de suplementar aminoácidos. En el escenario de menor inclusión se consideraron lisina, metionina y treonina, mientras que al 15 % se añadió además valina.

Un resultado particularmente relevante fue el escenario mixto de harina de pescado + Azolla, que presentó el menor costo calculado, con 2,74 USD/kg de proteína aportada. Esta respuesta puede interpretarse desde la complementariedad entre ambas fuentes: la harina de pescado mantiene parte de su aporte de proteína de elevada calidad, mientras que Azolla permite disminuir parcialmente la participación de una fuente convencional de mayor costo.

Esta interpretación resulta coherente con la evidencia productiva incorporada en el manuscrito. Abdelatty et al. (2020) encontraron que la inclusión moderada de harina de hoja de Azolla fue compatible con el mantenimiento del desempeño productivo, mientras que niveles superiores no necesariamente generaron beneficios adicionales. De manera complementaria, Abdelatty et al. (2021) observaron modificaciones en la morfología intestinal y microbiota cecal, aunque la inclusión del 10 % estuvo asociada con un incremento del

estrés oxidativo hepático, lo que evidencia que una mayor inclusión no implica necesariamente una mejor respuesta fisiológica.

En este caso, la convergencia entre los cálculos propios y la evidencia experimental resulta especialmente interesante. El menor costo estimado del escenario mixto, junto con los resultados reportados para niveles moderados de inclusión, sugiere que el mayor potencial de Azolla podría encontrarse en complementar parcialmente otras fuentes proteicas y no en maximizar su participación en la dieta. Sin embargo, el valor de 2,74 USD/kg debe interpretarse como una hipótesis económica derivada del escenario planteado. Su confirmación requeriría formular dietas completas equivalentes en energía metabolizable y aminoácidos digestibles y evaluar posteriormente desempeño productivo, conversión alimenticia y costo por kilogramo de peso producido.

## Conclusiones

La Azolla (*Azolla spp.*) presenta potencial como ingrediente complementario en dietas para pollos de engorde. Aunque su aporte proteico y digestibilidad son inferiores a los de la harina de pescado, su disponibilidad local y facilidad de producción pueden favorecer su inclusión parcial, siempre que se garantice un adecuado balance nutricional.

Su utilización podría reducir la dependencia de fuentes proteicas convencionales y contribuir a sistemas de producción más sostenibles. Sin embargo, las ventajas económicas identificadas deben considerarse referenciales, debido a que dependen de las condiciones de producción y procesamiento.

En este sentido, la Azolla no constituye un reemplazo total de la harina de pescado, pero puede incorporarse como parte de estrategias de alimentación más sostenibles. Se requieren estudios experimentales que permitan establecer niveles óptimos de inclusión y confirmar sus efectos productivos, económicos y ambientales.

## Referencias

- Abdelatty, A. M., Mandouh, M. I., Al-Mokaddem, A. K., Mansour, H. A., Khalil, H. M. A., Elolimy, A. A., Ford, H., Farid, O. A. A., Prince, A., Sakr, O. G., Aljuaydi, S. H., & Bionaz, M. (2020). Influence of level of inclusion of Azolla leaf meal on growth performance, meat quality and skeletal muscle p70S6 kinase  $\alpha$  abundance in broiler chickens. *Animal*, 14(11), 2423–2432. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001421>
- Abdelatty, A. M., Mandouh, M. I., Mohamed, S. A., Busato, S., Badr, O. A. M., Bionaz, M., Elolimy, A. A., Moustafa, M. M. A., Farid, O. A. A., & Al-Mokaddem, A. K. (2021). Azolla leaf meal at 5% of the diet improves growth performance, intestinal morphology and p70S6K1 activation, and affects cecal microbiota in broiler chicken. *Animal*, 15(10), 100362. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100362>
- Barua, M., Abdollahi, M. R., Zaefarian, F., Wester, T. J., Girish, C. K., & Ravindran, V. (2020). Standardized ileal amino acid digestibility of protein sources for broiler chickens is influenced by the feed form. *Poultry Science*, 99(12), 6925–6934. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.09.040>
- Brouwer, P., Bräutigam, A., Buijs, V. A., Tazelaar, A. O., van der Werf, A., Schlüter, U., Reichart, G. J., Bolger, A., Usadel, B., Weber, A. P. M., & Schluepmann, H. (2018). Metabolic adaptation, a specialized leaf organ structure and vascular responses to diurnal  $N_2$  fixation by *Nostoc azollae* sustain the astonishing productivity of Azolla ferns without nitrogen fertilizer. *Frontiers in Plant Science*, 9, 442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00442>

- Chakraborty, A., Saroja, M. K., Banerjee, A., Sarkar, S., Saha, M., Pradhan, B., Ravisankar, N., & Chatterjee, G. (2026). Azolla additives in traditional vegetable waste-cattle manure reshape the niche microbiome dynamics and orchestrate context-dependent biodegradation and nutrient cycling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 14(3), 122738. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.122738>
- Dhumal, M. V., Siddiqui, M. F., Chaudhary, M. K., & Khangembam, B. K. (2020). Effect of Azolla pinnata supplementation on growth performance, nutrient digestibility, carcass traits and blood biochemical parameters in broiler chickens. *Veterinary World*, 13(10), 2154–2160. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.2154-2160>
- Feedipedia. (2020). *Animal feed resources information system*. INRAE, CIRAD, AFZ, & FAO. <https://www.feedipedia.org>
- IndexMundi. (2024). *Fish meal monthly price – US dollars per metric ton*. <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=fish-meal>
- Kimani, S. M., Bimantara, P. O., Hattori, S., Tawaraya, K., Sudo, S., Xu, X., & Cheng, W. (2020). Co-application of poultry-litter biochar with Azolla has synergistic effects on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy soils. *Heliyon*, 6(9), e05042. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05042>
- Md Nasir, N. A. N., Kamaruddin, S. A., Zakarya, I. A., & Islam, A. K. M. A. (2022). Sustainable alternative animal feeds: Recent advances and future perspective of using azolla as animal feed in livestock, poultry and fish nutrition. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 25, 100581. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100581>
- Mugwanya, M., Dawood, M. A. O., Kimera, F., & Sewilam, H. (2023). Replacement of fish meal with fermented plant proteins in the aquafeed industry: A systematic review and meta-analysis. *Reviews in Aquaculture*, 15(1), 62–88. <https://doi.org/10.1111/raq.12701>
- National Research Council. (1994). *Nutrient requirements of poultry* (9th rev. ed.). National Academy Press.
- Nikkhah, F., Ramazanian, M. R., & Rosentrater, K. A. (2024). Prioritizing the valorization strategies of an invasive fern (Azolla) in a wetland. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101847. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101847>
- Nyein, N., & Iwai, C. B. (2025). Using Azolla microphylla in investigating different agro-wastewaters treatment and its biomass growth for carbon sequestration. *Results in Engineering*, 25, 103865. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103865>
- Rawat, N., Sawhney, S., Kumar, P., Bharati, J., & Singh, R. (2022). Azolla: A perspective paradigm for potential agricultural applications. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 11(4), 324–337. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2022.1104.045>
- Samad, F. A. A., Idris, L. H., Abu Hassim, H., Goh, Y. M., & Loh, T. C. (2020). Effects of Azolla spp. as feed ingredient on the growth performance and nutrient digestibility of broiler chicken. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 104(6), 1704–1711. <https://doi.org/10.1111/jpn.13345>
- Stambouli, F., Bouderbala, S., Boubekri, N., Djemli, S., & Kaddour, K. A. (2020). Effects of Azolla filiculoides on growth performance, carcass characteristics, and blood biochemistry of broiler chickens. *Tropical Animal Health and Production*, 52(5), 2337–2345. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02266-7>
- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2015). Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 23(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/23308249.2014.987209>

- Yao, Y., Zhang, M., Tian, Y., Zhao, M., Zeng, K., Zhang, B., Zhao, M., & Yin, B. (2018). Azolla biofertilizer for improving low nitrogen use efficiency in an intensive rice cropping system. *Field Crops Research*, 216, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.020>
- Yuan, H., Yang, W., Ali, S., Behan, A. A., Chen, L., Li, W., Gao, W., Arain, M. A., Nabi, F., Buzdar, J. A., & Li, Z. (2026). From ponds to pastures: Azolla as a functional and climate-smart feed resource for poultry and livestock. *Poultry Science*, 105(1), 106168. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.106168>