



Producción de harina de plumas hidrolizada como alternativa nutricional desde el enfoque de economía circular para el sector avícola de Villavicencio

Jermar Andrey Jiménez Ayala

ID 751281

Nicolas Augusto Úsuga Rubiano

ID 729106

Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO

Rectoría Oriente

Centro Universitario Villavicencio (Meta)

Programa Ingeniería Agroecológica

2025

Producción de harina de plumas hidrolizada como alternativa nutricional desde el enfoque de economía circular para el sector avícola de Villavicencio

Jermar Andrey Jiménez Ayala

ID: 751281

Nicolas Augusto Úsuga Rubiano

ID: 729106

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Agroecológico

Línea de investigación: Innovaciones sociales y productivas

Sub línea de investigación: Sistemas de conservación-producción en el trópico

Asesor(a)

Dora Adriana Lombo Rodríguez

Título académico

Ms. Médico veterinario zootecnista

Corporación Universitaria Minuto de Dios -UNIMINUTO

Rectoría Oriente

Centro Universitario Villavicencio (Meta)

Programa Ingeniería Agroecológica

2025

Dedicatoria

Este documento está dedicado a todas y cada una de las personas que hacen parte del círculo colaborativo institucional, personal que hace parte de la institución y por supuesto a nuestros padres que nos acompañan siempre en nuestra formación como profesionales. Además, a todas las personas interesadas en la actividad agropecuaria y que les llame la atención todo el enfoque de economía circular. También a cada una de las personas interesadas en este gran proyecto enfocado en economía circular y finalmente al público en general que vea en este trabajo un tema de interés.

Agradecimientos

A cada uno de los profesores que nos acompañaron y nos brindaron asesorías necesarias para retroalimentar el enfoque requerido para formarnos como profesionales, en especial a nuestra tutora de proyecto: la médico veterinario zootecnista Adriana Lombo Rodríguez, a la comunidad UNIMINUTO en general. A nuestros padres y familiares por el acompañamiento y apoyo durante este largo proceso de formación que con su esfuerzo y dedicación han logrado aportar de manera grandiosa para la realización de este proyecto.

- **Tabla de Contenido**

Contenido	Página
● Lista de tablas.....	7
● Lista de figuras.....	8
● Resumen.....	9
● Abstract.....	10
● Introducción.....	11
● Planteamiento del problema.....	13
● Pregunta de investigación.....	14
● Justificación.....	15
● Objetivos.....	18
● CAPÍTULO I.....	19
1.Marco Teórico.....	19
1.4 Normatividad nacional.....	24
1.4.1 Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos.....	24
1.5 Antecedentes.....	25
● CAPÍTULO II.....	27
● Metodología.....	27
3. Resultados.....	42
4. Discusión.....	55
5. Conclusiones.....	61
● Anexos.....	63
● Referencias bibliográficas.....	66

- **Lista de tablas**

Tablas	Página
Tabla 1. Materiales e insumos empleados en el proceso de transformación de plumas en harina.....	30
Tabla 2. Cronograma detallado del proyecto: fases, responsables, evidencias y materiales	39
Tabla 3. Cronograma mensual de actividades del proceso de transformación.....	40
Tabla 4. Balance mensual de subproductos generados por la planta de beneficio avícola.....	43
Tabla 5. Registro de pollos sacrificados y plumas recolectadas en la planta de beneficio.....	43
Tabla 6. Resultados experimentales de la muestra 1: hidrólisis prolongada.....	44
Tabla 7. Resultados experimentales de la muestra 2: secado extendido.....	45
Tabla 8. Resultados experimentales de la muestra 3: condiciones estándar.....	46
Tabla 9. Resultados experimentales de la muestra 4: tiempo de hidrólisis medio.....	47
Tabla 10. Resultados experimentales de la muestra 5: menor volumen de muestra.....	48
Tabla 11. Resultados experimentales de la muestra 6: mayor rendimiento.....	49
Tabla 12. Variables de las muestras.....	50
Tabla 13. Promedio de rendimiento.....	52
Tabla 14. Rendimiento total.....	52
Tabla 15. Resultados de Análisis bromatológico AGROSAVIA.....	53
Tabla 16. Determinación analítica resultados.....	53
Tabla 17. Comparativa de resultados.....	55
Tabla 18. Costo de producción de la elaboración de harina a base de plumas.....	65

- Lista de figuras

Contenido	Página
Figura 1. Composición estructural de la pluma	21
Figura 2. Procesos de transformación y obtención de harina.....	31
Figura 3. Proceso de limpieza y desinfección de la pluma.....	33
Figura 4. Proceso de secado primario.....	34
Figura 5. Proceso de hidrólisis.....	35
Figura 6. Proceso de secado post-hidrólisis.....	35
Figura 7. Proceso de molienda.....	36
Figura 8. Proceso de tamizado.....	37
Figura 9. Matriz de correlación de Pearson	51
Figura 10. Recolección.....	61
Figura 11. Lavado.....	61
Figura 12. Desinfección.....	61
Figura 13. Desinfección.....	61
Figura 14. Selección.....	61
Figura 15. Secado primario.....	61
Figura 16. Pluma en autoclave.....	61
Figura 17. Hidrólisis.....	61
Figura 18. Horno de secado.....	61
Figura 19. Pluma hidrolizada.....	61
Figura 20. Pesado post-hidrólisis.....	61
Figura 21. Tamiz.....	61

Figura 22. Tamizado.....	61
Figura 23. Pesado de muestra.....	61
Figura 24. Muestra 100 gr.....	61

- **Resumen**

En el presente trabajo se da la importancia del aprovechamiento en el residuo generado en la avicultura, con una propuesta para la generación de valor en la transformación de la pluma en la producción de harina como suplemento alimenticio pecuario.

También, se mencionan los beneficios que trae para la sociedad, el medio ambiente y la economía, aprovechar los residuos provenientes de la industria avícola, con el fin de aprovechar uno de los residuos del proceso de faenamiento del pollo, en especial la pluma, para obtener harina de pluma hidrolizada. Así mismo, se hace una breve descripción del proceso de elaboración de la harina y posteriormente se muestra un diagrama de flujo de procesos de producción que incluye recolección, limpieza, secado, hidrólisis, molienda y análisis bromatológico.

Se realizaron seis muestras con el propósito de evaluar diferentes condiciones del proceso de producción, permitiendo seleccionar el método óptimo y obtener una muestra inocua para el análisis bromatológico. Los resultados obtenidos evidenciaron que la harina de plumas presenta un alto contenido proteico, lo cual respalda su viabilidad como alternativa nutricional. Asimismo, se diseñó un diagrama de Gantt que permitió planificar y controlar las etapas del proyecto, vinculando actividades y resultados. La implementación de esta propuesta contribuye no solo a la valorización de residuos avícolas, sino también al fortalecimiento de la sostenibilidad del sector desde un enfoque de economía circular.

Palabras clave: residuos, aprovechamiento, avicultura, pluma, suplemento, harina, temperatura, presión, hidrólisis, economía circular

- **Abstract**

In this work, the importance of the use of the waste generated in poultry farming is given, with a proposal for the generation of value in the transformation of feathers in the production of flour as a livestock feed supplement.

Also, the benefits that taking advantage of waste from the poultry industry brings to society, the environment and the economy are mentioned, in order to take advantage of one of the residues of the chicken slaughtering process, especially the feather, to obtain hydrolyzed feather meal. Likewise, a brief description of the flour production process is made and then a flow diagram of production processes is shown that includes collection, cleaning, drying, hydrolysis, milling and bromatological analysis.

Six samples are taken in order to experiment with process conditions, selecting the most optimal and taking the most innocuous sample for bromatological analysis. The results show that feather meal has a high protein content and is viable, a Gantt chart is designed that references the realization of the project together with its results. In addition, their implementation can contribute to waste reduction and improve the sustainability of the poultry sector.

Keywords: waste, utilization, poultry, poultry farming, feather, supplement, meal, temperature, pressure, hydrolysis, circular economy

Introducción

El manejo de residuos orgánicos generados por la industria avícola representa un desafío ambiental y productivo de gran relevancia. En especial, las plumas de aves, al ser ricas en queratina y altamente resistentes a la degradación, constituyen uno de los residuos más abundantes y complejos de tratar (Onifade et al., 1998). A nivel mundial, se han desarrollado diversas investigaciones orientadas a su aprovechamiento, entre ellas la transformación en harina de plumas hidrolizada, un subproducto con alto contenido proteico que puede ser utilizado como insumo para alimentos balanceados (Papadopoulos et al., 1985). En Brasil, por ejemplo, se ha documentado con éxito el uso de procesos de hidrólisis térmica para producir harina de plumas con propiedades nutricionales comparables a otras fuentes proteicas convencionales (Silva et al., 2014).

En Colombia, el aprovechamiento de residuos agroindustriales sigue siendo una tarea pendiente. Aunque el Departamento Nacional de Planeación (2018) propuso un 20% de aprovechamiento de residuos que van a los rellenos sanitarios, los datos muestran que aún no se alcanza dicho porcentaje, manteniéndose en un 17%. A nivel regional, especialmente en el departamento del Meta y su capital Villavicencio, el crecimiento del sector avícola ha generado un aumento significativo de subproductos orgánicos sin una gestión adecuada, generando impactos negativos en el entorno y pérdidas potenciales de materia prima aprovechable (Chaparro, 2020).

La harina de plumas hidrolizada (HPH), al ser una fuente alternativa de proteína de alta digestibilidad y palatabilidad, representa una solución viable para transformar residuos avícolas en insumos útiles para la alimentación animal (Campos et al., 2020). Según la Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA), este tipo de harina contiene más del 80% de proteína, lo que

contribuye significativamente al mejoramiento de la dieta de animales de granja, especialmente en sistemas intensivos de producción.

Pese a los avances tecnológicos y al potencial identificado, en el contexto local de Villavicencio no se han implementado procesos sostenibles y sistemáticos para el aprovechamiento de plumas de aves, lo que genera un vacío técnico, investigativo y económico. Esta situación da lugar a la presente investigación, la cual propone el diseño y producción experimental de harina de plumas hidrolizada, bajo parámetros de inocuidad y calidad nutricional, desde un enfoque de economía circular.

El objetivo general de este trabajo fue evaluar la viabilidad de la producción de harina de plumas hidrolizada como alternativa nutricional y como estrategia de valorización de residuos sólidos en el sector avícola de Villavicencio. Para ello, se desarrollarán procesos de recolección, tratamiento, análisis bromatológico y caracterización del producto final.

Este estudio busca no solo aportar al desarrollo de soluciones técnicas y sostenibles para la gestión de residuos orgánicos, sino también contribuir a la innovación en la industria de alimentos balanceados, reduciendo la dependencia de fuentes proteicas convencionales, y fomentando prácticas alineadas con los principios de la economía circular.

Planteamiento del Problema

La producción avícola en Colombia, además de ser una de las principales actividades agropecuarias generadoras de empleo y alimentos, también es responsable de la generación de grandes cantidades de residuos orgánicos, entre los cuales se encuentran las plumas de ave. Estos residuos, si no se gestionan de manera adecuada, representan un foco de contaminación ambiental y un riesgo sanitario, debido a su lenta degradación y su acumulación en zonas rurales y periurbanas (González et al., 2018; FENAVI, s.f.).

En el contexto colombiano, se estima que la producción de pollo genera alrededor de 1,3 kg de residuos por ave sacrificada, lo que implica un volumen significativo si se considera que en 2020 se produjeron cerca de 1.400 millones de pollos (DANE, 2020). Esta situación refleja un alto potencial de residuos reutilizables que actualmente se desaprovechan. A pesar de que la Guía Ambiental del Subsector Avícola (FENAVI, s.f.) destaca la necesidad de una gestión adecuada de estos residuos, muchos productores enfrentan barreras técnicas, económicas y de conocimiento para implementar soluciones sostenibles.

En regiones como Villavicencio, donde la producción avícola es significativa, el problema se agrava debido a la falta de infraestructura para el tratamiento de residuos y el escaso conocimiento sobre alternativas de aprovechamiento, como la transformación de plumas en harina hidrolizada (Universidad de los Llanos, 2020; Rodríguez et al., 2019). Este subproducto, de alto valor proteico, podría integrarse como insumo nutricional en alimentos balanceados, promoviendo un modelo de economía circular en el sector. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos técnicos, económicos y ambientales que aún no han sido debidamente explorados a nivel local (García et al., 2020).

Adicionalmente, la disposición inadecuada de plumas puede convertirse en un foco de contaminación del suelo, del aire y en generador de enfermedades, afectando directamente la sostenibilidad del sistema avícola y la salud pública (De los Ángeles Gutiérrez, 2021; Rofner, 2019). La necesidad de transformar estos residuos en recursos valiosos, mediante tecnologías viables y sostenibles, se alinea con las metas de desarrollo sostenible y la transición hacia una producción más responsable.

En consecuencia, en la presente investigación se propuso evaluar la viabilidad técnica y eficiente de producir harina de plumas hidrolizada como alternativa nutricional con un enfoque de economía circular en el sector avícola de Villavicencio, con el fin de contribuir a la reducción del impacto ambiental, mejorar el aprovechamiento de residuos y fortalecer las capacidades productivas de los pequeños y medianos avicultores.

Pregunta de investigación

¿Cuál es la viabilidad técnica de la producción de harina de plumas hidrolizada como alternativa nutricional dentro del enfoque de economía circular para el sector avícola en Villavicencio?

Justificación

La avicultura es una de las ramas más importantes de la producción animal, ya que contribuye significativamente a mitigar la escasez proteica en la población humana, gracias a su capacidad de generar carne y huevos a bajo costo y en corto tiempo (Lee & Kim, 2019). Sin embargo, uno de los principales retos que enfrenta este sector es el manejo adecuado de sus residuos, especialmente las plumas, que representan entre el 5% y 10% del peso total del ave y contienen una alta proporción de proteína estructural en forma de queratina.

Diversos estudios han demostrado que, mediante procesos de hidrólisis, es posible transformar este subproducto en harina de plumas hidrolizada, un ingrediente de alto valor nutricional y económico para la suplementación animal. Esta harina, al reincorporarse en la cadena productiva, no solo reduce la carga contaminante, sino que también promueve la economía circular en el sector pecuario (Hernández & González, 2019; Lee & Kim, 2019). De este modo, el aprovechamiento de residuos avícolas mediante la producción de harina de plumas representa una estrategia sostenible y rentable para el desarrollo agropecuario.

Lo cierto es que, bajo un adecuado tratamiento, estos desechos pueden ser transformados y así como resultado satisfactorio, se podría proceder a la realización de un producto altamente proteico que sirve como alimento de animales o materia prima para la elaboración de alimentos balanceados. Un negocio rentable, productora de harina de plumas de pollo, enfocada en la producción de alimentos balanceados para el sector agropecuario. Debido al alto nivel de rentabilidad cada vez más empresas avícolas dedican a la fabricación de harina de plumas; esto se debe principalmente a que obtiene una utilidad de una materia como es la pluma de pollo (Sánchez, 2019).

De esta manera, debe establecerse la gestión integral de residuos sólidos como un aspecto relevante, eje principal y orientada a realizar de la mejor manera la disposición final de los residuos sólidos desde el factor ambiental. Teniendo en cuenta su caracterización, procedencia, recuperación, tratamiento, reutilización, aprovechamiento y comercialización. Así mismo la inclusión de la economía circular y los subproductos de la producción avícola son factores determinantes y valiosos si se manejan adecuadamente. También se dispone de una gran variedad de sistemas y enfoques tales como la utilización de subproductos, el reciclado en componentes para la recuperación de materiales y la generación de un aprovechamiento de residuos, que pueden dar resultados satisfactorios si se explotan y gestionan convenientemente (FAO, 2020).

La producción de aves de corral para consumo humano, por ejemplo, es responsable de la generación de grandes cantidades de subproductos. Al procesar estos subproductos avícolas, se obtienen valiosas fuentes de nutrientes, a saber, harina de subproductos avícolas (PBM; obtenida de cabezas, carne magullada, huesos y vísceras) y harina de plumas hidrolizada (HF; obtenida de plumas y, a veces, junto con algo de sangre), fuentes importantes de proteínas, antioxidantes y ácidos grasos (Campos et al., 2020).

A escala mundial se han realizado numerosos trabajos de investigación sobre la forma de recuperar los nutrientes y productos orgánicos de valor agregado procedentes de los residuos de los animales, a fin de mejorar la eficiencia agrícola y mitigar los impactos ambientales. Muchos de los sistemas y enfoques pueden tener éxito si se manejan y mantienen correctamente. Además, también puede reducir las emisiones de olores molestos procedentes de las zonas de almacenamiento y tratamiento de los residuos avícolas. Hay toda una serie de métodos, desde sistemas muy simples hasta

sistemas automatizados complejos, a disposición de los pequeños y grandes productores de aves de corral (FAO, 2020).

La creciente demanda de proteínas de alta calidad para la alimentación animal ha llevado a la búsqueda de fuentes alternativas y sostenibles (Ahmed & Khan, 2019). La producción avícola es una de las actividades más importantes en el sector agropecuario colombiano, y la región del Meta es una de las principales productoras de pollo del país (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2020). Sin embargo, la producción avícola también genera una gran cantidad de residuos orgánicos, como plumas, que pueden ser aprovechados para producir harina de plumas hidrolizada, una fuente de proteína de alta calidad para la alimentación animal (López et al., 2020).

La investigación sobre la producción de harina de plumas hidrolizada en Villavicencio es importante porque plantea una alternativa para el aprovechamiento de los residuos avícolas (Plumas), en la producción de harina de plumas hidrolizada, reduciendo la cantidad de desechos y minimizando el impacto ambiental (Patel & Sharma, 2018). De igual manera, La harina de plumas hidrolizada es una fuente de proteína sostenible y de alta calidad para la alimentación animal, lo que puede reducir la dependencia de fuentes de proteínas convencionales (Kim & Lee, 2020). Por otra parte, La producción de harina de plumas hidrolizada puede generar oportunidades económicas para los productores avícolas en Villavicencio, al crear un nuevo producto con valor agregado (Universidad de los Llanos, 2020).

Objetivos

Objetivo General:

Evaluar la viabilidad técnica de la producción de harina de plumas hidrolizada bajo 4 variables de transformación, a partir de subproductos del sector avícola en Villavicencio, con un enfoque de economía circular.

Objetivos Específicos:

1. Diseñar un proceso de producción de harina de plumas hidrolizada que sea eficiente y sostenible.
2. Determinar la calidad nutricional y funcional de la harina producida a partir de plumas y compararla con estudios retrospectivos.
3. Identificar las condiciones operacionales más eficientes de procesamiento de plumas a partir del análisis bajo las 4 variables de transformación que permita el mayor rendimiento de harina de plumas.

CAPÍTULO I

1. Marco Teórico

1.1 Economía circular en el sector avícola

La economía circular es un modelo de producción y consumo que promueve la reutilización, el reciclaje, la valorización y la reducción de residuos con el fin de prolongar el ciclo de vida de los productos, reduciendo la presión sobre los recursos naturales. En el contexto del sector avícola, este enfoque cobra especial relevancia por el volumen de residuos orgánicos generados, especialmente plumas, vísceras, estiércol y aguas residuales, los cuales tradicionalmente han sido desechados sin un aprovechamiento eficiente (FAO, 2020).

El aprovechamiento de estos subproductos mediante procesos de transformación sostenible — como la elaboración de harinas de plumas hidrolizadas— se alinea con los principios de la economía circular, al convertir residuos en recursos con valor agregado, minimizando los impactos ambientales y generando oportunidades económicas. Este tipo de prácticas también responde a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente al ODS 12: Producción y consumo responsables (ONU, 2015). “La economía circular propone un nuevo paradigma en el que los residuos no existen, sino que se convierten en recursos para nuevos procesos productivos” (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

1.2. Procesos o técnicas para la producción de harinas hidrolizadas

La harina de plumas hidrolizada se obtiene a partir del tratamiento térmico y/o enzimático de las plumas de ave, con el objetivo de romper los enlaces de la queratina y mejorar su digestibilidad como fuente proteica en alimentación animal. El proceso más comúnmente utilizado es la hidrólisis térmica, que implica cocción a alta presión (mayor a 130 °C) durante un tiempo controlado, lo que

permite transformar la proteína con queratina insoluble en compuestos más simples y digeribles (Williams, s.f.; Reddy & Santosh, 2016).

Existen también métodos enzimáticos que utilizan proteasas queratinolíticas específicas, las cuales degradan la queratina de forma más selectiva y con menores impactos térmicos, conservando mejor la calidad de los aminoácidos esenciales (Onifade et al., 1998). La elección del método depende de factores como la escala de producción, disponibilidad tecnológica y costos. “La hidroxilación enzimática de plumas representa una alternativa sostenible a la transformación térmica tradicional, permitiendo un mejor aprovechamiento proteico del residuo” (Gupta & Ramnani, 2006).

1.3. Contaminación a causa de los desechos avícolas

El crecimiento del sector avícola en Colombia ha traído consigo un aumento significativo en la generación de residuos. Estos incluyen plumas, excretas, restos orgánicos, y aguas residuales contaminadas, los cuales, si no se manejan adecuadamente, pueden representar una fuente de contaminación del suelo, agua y aire (Ariza, 2018).

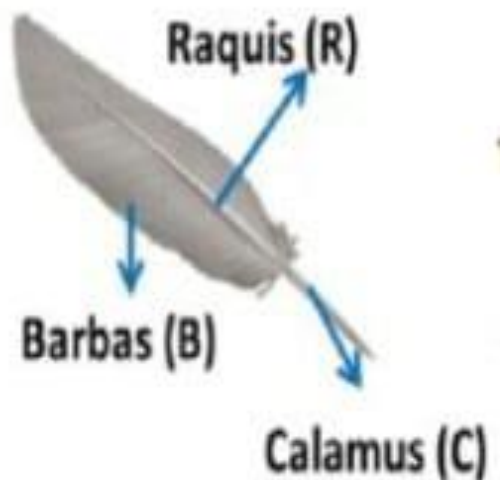
Las plumas, en particular, al ser resistentes a la degradación por su alto contenido de queratina, pueden acumularse en plantas de beneficio y generar olores ofensivos, proliferación de vectores y ocupación de espacio de disposición final. Además, los lixiviados de estos residuos pueden contaminar fuentes hídricas si no se gestionan apropiadamente (Bolívar, 2022).

La contaminación por residuos avícolas también contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), como metano (CH₄) y óxidos de nitrógeno (NO_x), principalmente derivados de la descomposición anaerobia de los residuos orgánicos (FAO, 2020). Esto refuerza la necesidad urgente de aplicar estrategias de economía circular para mitigar el impacto ambiental de este sector.

“Una gestión inadecuada de los residuos avícolas puede comprometer seriamente la sostenibilidad del sector y la calidad ambiental de las regiones productoras” (Cervantes, 2021).

- **Figura 1**

Composición estructural de la pluma raquis, barbas y calamus.



Fuente (Rofner, 2019)

1.2.2. Aprovechamiento De Las Plumas

Los subproductos que se tienen en la producción de aves se pueden aprovechar para la elaboración de harina a base de plumas, para la obtención de la harina se tienen unas etapas como es la hidrólisis que permiten la obtención de un subproducto (Parzanese, 2018).

La harina que proviene de las plumas de producción de pollos es un polvo derivado de la cocción bajo presión de la pluma limpia, sin ser descompuesta y bajo condiciones de secado y molido respectivamente. Además, este producto es un insumo muy relevante para realizar alimento balanceado, debido a su alto contenido proteico, tomando como factor más importante el grado de hidrólisis y teniendo en cuenta que este determina el porcentaje de digestibilidad entre baja y alta: de 65% (sobre procesada) a 92% (cruda o con falta de procesamiento) (Sánchez, 2019).

Hoy en día, se sabe que las harinas de proteína animal proporcionan una buena fuente de aminoácidos esenciales (AAE), pero también son buenas fuentes de energía y minerales (especialmente

Fósforo y Calcio disponible). Estos subproductos se caracterizan por su alto contenido en proteínas y energía de buena calidad, un perfil razonable de AAE. La harina es una fuente de proteína animal que proporciona una fuente de aminoácidos energía y minerales, estos subproductos se caracterizan por tener buenas características de calidad proteicas. (Parzanese, 2018).

El aprovechamiento de este subproducto para obtener harina de pluma hidrolizada es una excelente opción de provecho de este residuo para suplir deficiencias en proteínas de algunas materias primas que se emplean en la industria de elaboración de alimentos concentrados para animales. Igualmente, el aprovechamiento de este subproducto contribuye a disminuir el impacto ambiental generado por las plantas de beneficio por su difícil disposición, degradación de aguas, suelo y emisiones de gases con efecto invernadero. (AVICULTORES, 2020)

De igual manera, la harina a base de pluma de pollo es un producto muy digestible y de alto contenido proteico, que brinda gran energía al ser consumido gracias a que son ricas en queratina, una proteína muy importante, y materia prima principal de la harina. La harina a base de la pluma de pollo debe cumplir con las necesidades mínimas de los nutrientes, además de tener muy en cuenta el correcto suministro de energía, aminoácidos, proteínas, ácidos grasos, minerales y vitaminas; los cuales son necesarios para la alimentación (RAE, 2017).

1.3 Recolección de residuos sólidos en zona regional

La gestión adecuada de residuos sólidos es fundamental para garantizar la sostenibilidad ambiental y la salud pública. En Villavicencio, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) ha llevado a cabo diagnósticos sobre la recolección de residuos sólidos, evidenciando la necesidad de implementar sistemas eficientes para su manejo. Estos estudios resaltan la importancia de contar con infraestructuras adecuadas y procesos estandarizados para la recolección y disposición final de residuos (ICA. 2007).

En términos de residuos sólidos, según la actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos sólidos (PGIRS) del municipio de Villavicencio, emitido por la Corporación para el desarrollo sociocultural

de la Amazonía y la Orinoquía Colombiana en 2015, la capital del Meta genera en promedio 444 Toneladas de residuos sólidos por día, acá están incluidas las plumas como residuo sólido avícola, los cuales son recolectados, transportados y dispuestos. Es decir, 11.525 Toneladas por mes, así mismo, la actualización del PGIRS asegura que el tipo de residuos que más se generan en la ciudad y su área de influencia son de tipo orgánico con un 69.9% (Corporación para el desarrollo sociocultural de la Amazonía y la Orinoquía Colombiana. 2015).

El municipio de Villavicencio cuenta con uno de los mejores rellenos sanitarios de Colombia, se encuentra en la vereda San Juan Bosco, en el Km 18 de la vía a Puerto Porfía, el cual antes era llamado relleno sanitario Don Juanito convertido en 2002 en el Parque Ecológico Reciclante. Su construcción y diseño especial aparte de su cumplimiento por lo dispuesto en el Reglamento Técnico de Saneamiento Básico y Agua Potable, permite ser una de las mejores alternativas para el manejo de residuos sólidos de Villavicencio y otros municipios a los cuales se les realiza también manejo de residuos sólidos (Bioagrícola del Llano. 2025).

Además, realiza capacitaciones sociales sobre separación en la fuente, gestión integral de residuos sólidos, teoría de las cuatro RRRR: Reciclar, reducir, reutilizar y recuperar, cultura del servicio del aseo, clasificación de los residuos, cómo aprovechar los residuos, sentido de pertenencia con la ciudad y cultura del medio ambiente (Bioagrícola del Llano. 2025).

Directrices del INVIMA: El Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) proporciona guías técnicas para la elaboración de programas sanitarios en establecimientos avícolas. Estas guías incluyen la necesidad de contar con planos que especifiquen rutas sanitarias para la gestión de residuos sólidos, evitando la contaminación cruzada. Además, el INVIMA establece requisitos sanitarios para la producción y comercialización de productos derivados de aves, asegurando su inocuidad y calidad (INVIMA. 2023).

1.4 Normatividad nacional

El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) expidió la Resolución 991 de 2001, en la que permite la fabricación de este tipo de harinas, teniendo como materia prima los subproductos del pollo y del pescado; sin embargo, prohíbe el uso de todas las harinas procedentes de mamíferos en la dieta de los rumiantes (ICA 2001).

En Colombia el Consejo Nacional de Política Económica y Social, en el documento CONPES 3468 de 2007 sobre política nacional de sanidad e inocuidad para la cadena avícola, estableció los lineamientos encaminados a mejorar el estatus sanitario y la inocuidad de los alimentos en dichas cadenas productivas, con el fin de proteger la salud y vida de las personas, preservar la calidad del ambiente, mejorar la competitividad en el procesamiento nacional y aumentar la capacidad para lograr su admisibilidad en los mercados internacionales mediante diferentes acciones interinstitucionales con el apoyo del sector privado (CONPES. 2007).

1.4.1 Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos

Decreto 1077 de 2015: Este decreto establece que los PGIRS son instrumentos de planeación municipal o regional que contienen objetivos, metas, programas, proyectos, actividades y recursos para el manejo de residuos sólidos, basados en diagnósticos y proyecciones futuras, con un plan financiero viable que garantice el mejoramiento continuo del manejo de residuos y la prestación del servicio de aseo.

Resolución 754 de 2014: Define la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los PGIRS. Esta resolución busca que los proyectos tengan viabilidad financiera e institucional, permitiendo a las entidades territoriales incluir en sus planes de desarrollo las acciones y presupuestos necesarios para lograr una gestión sostenible de los residuos sólidos.

Decreto 2981 de 2013: Reglamenta la prestación del servicio público de aseo y establece que la formulación e implementación del PGIRS debe estar en consonancia con los planes de ordenamiento territorial y debe revisarse y actualizarse dentro de los doce meses siguientes al inicio del período constitucional del alcalde distrital o municipal. Además, enfatiza la participación de los recicladores de oficio en la formulación, implementación y actualización del PGIRS (Presidencia de la República de Colombia. 2013).

La implementación efectiva de los PGIRS contribuye significativamente a la reducción de la contaminación ambiental. Al promover el aprovechamiento de residuos y minimizar la cantidad destinada a disposición final, se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero y se preservan los recursos naturales. Además, la correcta gestión de residuos previene la contaminación de cuerpos de agua y suelos, protegiendo la biodiversidad y la salud pública.

En la generación de harina a partir de plumas, la integración de estas normativas y prácticas puede destacar cómo el aprovechamiento de residuos avícolas se alinea con las políticas nacionales de gestión sostenible de residuos y contribuye a la economía circular.

- **1.5 Antecedentes**

A nivel local, en Bogotá D.C., Chaparro (2020) desarrolló un proyecto de aprovechamiento residual avícola basado en la transformación de plumas de pollo en harina mediante un proceso de hidrólisis. El objetivo principal fue evaluar la eficiencia del proceso hidrolítico en la descomposición de la queratina contenida en las plumas, con el fin de obtener un subproducto proteico útil en alimentación animal. Este proyecto resaltó la importancia de controlar variables como presión, temperatura y tiempo para lograr una textura adecuada que permitiera continuar con procesos como el secado, molienda, tamizado y empaquetado. Entre sus principales aportes, se destaca la validación de un protocolo técnico que hace viable la transformación industrial de un residuo altamente contaminante.

En cuanto a la composición, las plumas contienen una escleroproteína conocida como queratina, que representa entre el 85% y 90% del contenido nitrogenado. Dicha proteína es resistente a la hidrólisis natural, pero puede ser transformada mediante procesos controlados en un producto altamente digestible y rico en aminoácidos como treonina, arginina, valina, leucina, cisteína, histidina, lisina y metionina (Chaparro, 2020).

A nivel de países vecinos, en Perú, Rofner (2019) implementó un proyecto en una empresa avícola para transformar las plumas de pollo en harina proteica. El objetivo fue convertir este residuo en un insumo alimenticio pecuario, minimizando su impacto ambiental y generando valor económico para la empresa. El desarrollo metodológico incluyó etapas de lavado, hidrólisis, molienda, tamizado, análisis bromatológico y empaquetado. El aporte central del proyecto fue demostrar la viabilidad económica y técnica del aprovechamiento de este residuo *in situ*, lo que permitió a la empresa reducir sus costos operativos y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

En Ecuador, Sánchez (2019) propuso el diseño de una planta productora de harina de plumas de pollo en el cantón Santa Elena, con el objetivo de atender la demanda de alimentos balanceados en el sector agropecuario. Mediante un estudio de mercado y un análisis técnico, económico y tecnológico, se concluyó que la demanda insatisfecha de este producto alcanzaba el 98,54%. El aporte clave de esta investigación fue proporcionar una propuesta integral de planta industrial, desde el dimensionamiento técnico hasta la validación económica del proyecto, reforzando la viabilidad del producto en el mercado peninsular y nacional.

A nivel nacional y mundial, diversas investigaciones han coincidido en el potencial de la harina de plumas como un subproducto proteico de alto valor, particularmente en el contexto de la economía circular y la sostenibilidad ambiental.

● **CAPÍTULO II**

Metodología

Esta investigación tiene un enfoque mixto, al combinar datos cuantitativos (como rendimiento, peso y análisis bromatológico) y cualitativos (observaciones y entrevistas), tal como proponen Hernández & Fernández (2014), quienes destacan que este enfoque permite una visión más completa del problema.

El método es experimental, ya que se manipularon condiciones como tiempo de secado, molienda e hidrólisis para evaluar su efecto en el producto final, conforme al planteamiento de Sampieri et al. (2014), quienes definen este método como la intervención controlada sobre variables para observar resultados.

- *Cuantitativo*: Análisis de rendimiento (% harina), proteína, fibra, cenizas, humedad.
- *Cualitativo*: Entrevistas a funcionarios de la planta de beneficio.

Tipo de investigación

La presente investigación se clasifica como de tipo experimental, ya que se manipularon deliberadamente variables como el tiempo de hidrólisis, secado y molienda para observar sus efectos sobre el rendimiento y la calidad de la harina de plumas obtenida. Según Sampieri, Collado y Lucio (2014), la investigación experimental “busca establecer relaciones causales entre variables, a través de la aplicación de un tratamiento en condiciones controladas”. Este enfoque permite comprobar de

manera objetiva la viabilidad técnica del proceso propuesto, mediante la repetición de pruebas con distintos parámetros.

- Experimental: Procesamiento de 6 muestras bajo condiciones controladas de las 4 variables (tiempo de hidrólisis, tiempo de secado, tiempo de molienda y tiempo de tamizado).

Técnicas de recolección

Para la recolección de la información se utilizaron instrumentos como guías de observación, entrevistas al personal de la planta de beneficio, registros fotográficos y fichas técnicas de procesos, los cuales se encuentran en la sección de anexos del proyecto. Estos instrumentos permitieron sistematizar los datos obtenidos durante cada etapa del procesamiento de las plumas, así como documentar las condiciones ambientales, operativas y sanitarias.

- Primarias: Registros y fichas técnicas de Peso de plumas, tiempos de procesamiento, tiempos de secado, tiempo de tamizado y de molienda, análisis bromatológico.
- Secundarias: Revisión de normativas Decretos 2981 de 2013 y Decreto 1077 de 2015. Encuestas a personal de la planta de beneficio, artículos e investigaciones relacionadas con el tema de la investigación.

A la vez se considera como población a la totalidad de pollos sacrificados durante un mes en la planta de beneficio en Villavicencio y se determina como muestra al total de residuos generados y suministrados por la planta de beneficio (23 kilos).

- **Población:** 243,171 pollos sacrificados/mes en la planta de beneficio (Tabla 5).
- **Muestra:** 23 kg de plumas suministradas por la planta de beneficio. (10% del peso total de plumas/mes).

En el proceso que se tiene para la obtención de la harina se tienen cálculos estadísticos como nos dice la teoría si por cada 20 pollos el peso del subproducto obtenido es de 3 kilos de pluma. De este modo, realizando el proceso con 100 pollos obtendremos aproximadamente 15 kilos de plumas.

2. Fases de Desarrollo del Proyecto

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en las siguientes fases, organizadas cronológicamente para garantizar una ejecución eficiente y coherente con los objetivos planteados:

2.1. Fase de Planeación

- Revisión bibliográfica sobre el aprovechamiento de subproductos avícolas, en especial la producción de harina de plumas.
- Definición del problema, objetivos, justificación y marco teórico.
- Elaboración del cronograma de actividades y presupuesto estimado.
- Identificación de fuentes de recolección del subproducto (plumas).

2.2. Fase de Recolección y Preparación de Materia Prima

- Coordinación con la planta de beneficio avícola para la recolección de plumas (23 kg en total).
- Transporte y almacenamiento temporal bajo condiciones sanitarias adecuadas.
- Verificación del estado físico de la materia prima.

2.3. Fase de Procesamiento Experimental

- Sanidad: Lavado con agua, bicarbonato y vinagre.
- Secado Primario: Oreado en anejo hasta lograr deshidratación preliminar.
- Hidrólisis: Tratamiento térmico a 125°C y 0.15 MPa durante lapsos controlados.
- Secado Post-Hidrólisis: Deshidratación en horno entre 2 a 6 horas.
- Molienda: Reducción de tamaño con molino eléctrico.
- Tamizado: Separación de partículas mediante tamiz n°14.

2.4. Fase de Evaluación del Producto

- Realización de seis muestras bajo condiciones variables para optimización del rendimiento.
- Cálculo del porcentaje de rendimiento mediante las correlaciones entre las variables por medio la matriz de correlación de Pearson.
- Análisis bromatológico de las muestras en laboratorio certificado (AGROSAVIA).
- Registro de resultados, interpretación y validación del contenido proteico.

2.5. Fase de Documentación y Conclusiones

- Análisis de resultados, redacción del informe técnico y conclusiones.
- Evaluación de la viabilidad técnica y ambiental del proceso y propuesta de implementación en el contexto local bajo principios de economía circular.

Materiales

Tabla 1.

Materiales para el proceso de transformación

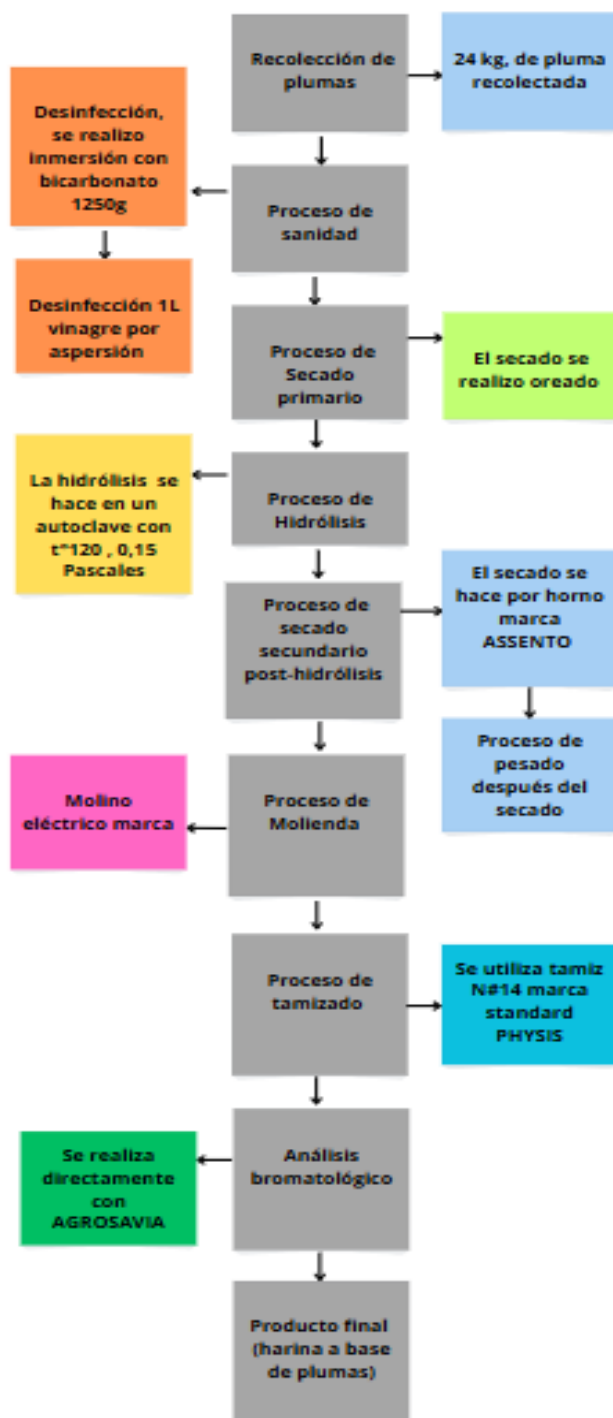
Materiales empleados en el proceso de transformación de plumas en harina

Insumos	Equipos	Instrumentos
• Subproducto avícola (Plumas)	• Molino con motor	• Tamiz metálico
• Recurso hídrico	• Autoclave	• Recuadro de madera para deshidratación
• Caneca de 200 litros	• Gramera eléctrica	• Guantes
• Utensilios de desinfección	• Horno	• Tapabocas
• Alcohol desinfectante	-	• Bolsa hermética
• Vinagre	-	• Papel Kraft
• Bicarbonato	-	• Guantes de carnaza
-	-	• Lona

Fuente: Elaboración propia

Figura 2

Procesos de transformación para la obtención de harina de plumas



Fuente Elaboración propia

Desarrollo metodológico del proyecto

La tabla presenta los procesos de transformación para obtención de harina a partir de plumas, el cual siguió una serie de etapas clave: Primero, se realizó la recolección de plumas, obtención de la materia prima del proceso. Luego, se sometió a un proceso de sanidad para garantizar su higiene y calidad. Posteriormente, las plumas pasaron por un secado primario, donde se redujo su contenido de humedad antes de la hidrólisis, tras este proceso, el material se sometió a un pesado post-hidrólisis para medir la cantidad obtenida y luego a un secado secundario post-hidrólisis, que reduce aún más la humedad para mejorar su estabilidad. A continuación, el producto seco fue procesado mediante molienda, logrando una textura más fina para luego ser tamizado, donde se separan partículas de distintos tamaños para obtener un producto homogéneo.

Una vez tamizado, el material es nuevamente fue pesado y sometido a un análisis bromatológico, donde se evaluaron sus propiedades nutricionales y calidad. Como resultado final se obtuvo la harina a base de plumas, este proceso permite un aprovechamiento eficiente de subproductos, asegurando un producto de calidad.

2.1 Proceso de recolección de plumas

Se acudió a la planta de beneficio para el suministro de las plumas y así poder iniciar con el proceso de sanidad y transformación respectivamente. Se debe verificar que el estado de la pluma suministrada por la planta de beneficio esté en óptimas condiciones para su debido uso y proceso.

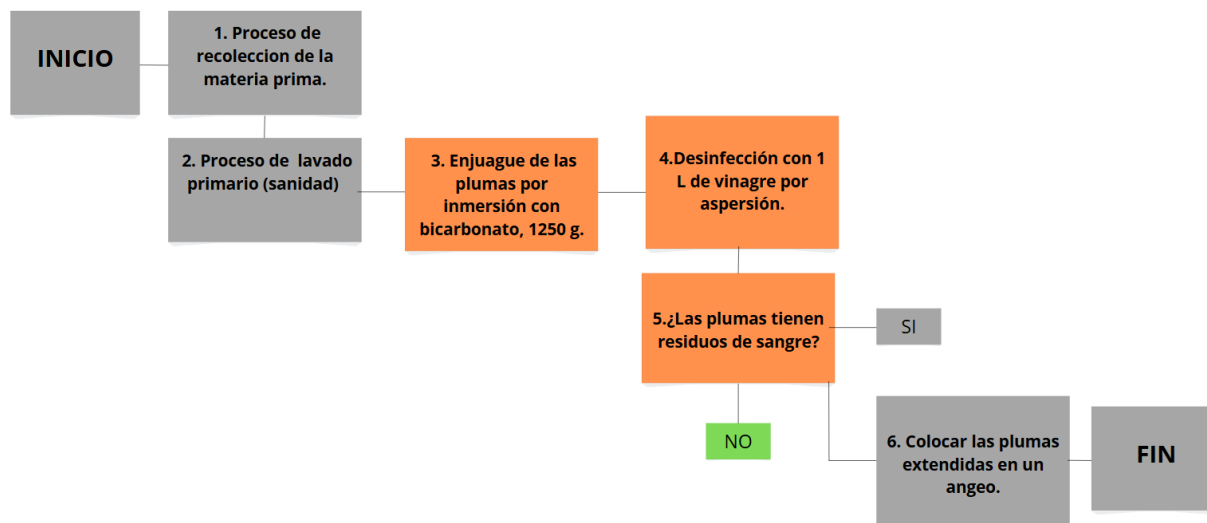
2.2 Proceso de sanidad

Durante este proceso se lavaron las plumas hasta dejarlas limpias y sin restos de sangre o heces. Las plumas se colocan en un suelo cubierto y se lavan con agua por 30 minutos para eliminar todos los residuos existentes sobre ella. Luego se realizó un segundo lavado en una caneca de 250 litros de agua y con una proporción de bicarbonato del 5%, es decir que se vertió 1250 gr de bicarbonato. Esta solución con las plumas se mezcló adecuadamente para una desinfección correcta y posteriormente se extrajo el

exceso de agua para llevar a un extendido sobre angeo y posteriormente hacer aspersión de una solución de vinagre con agua, en proporción de 5%, es decir que se disuelve 5 mililitros de vinagre por un litro de agua.

Figura 3

Proceso de limpieza y desinfección de la pluma. Elaboración propia

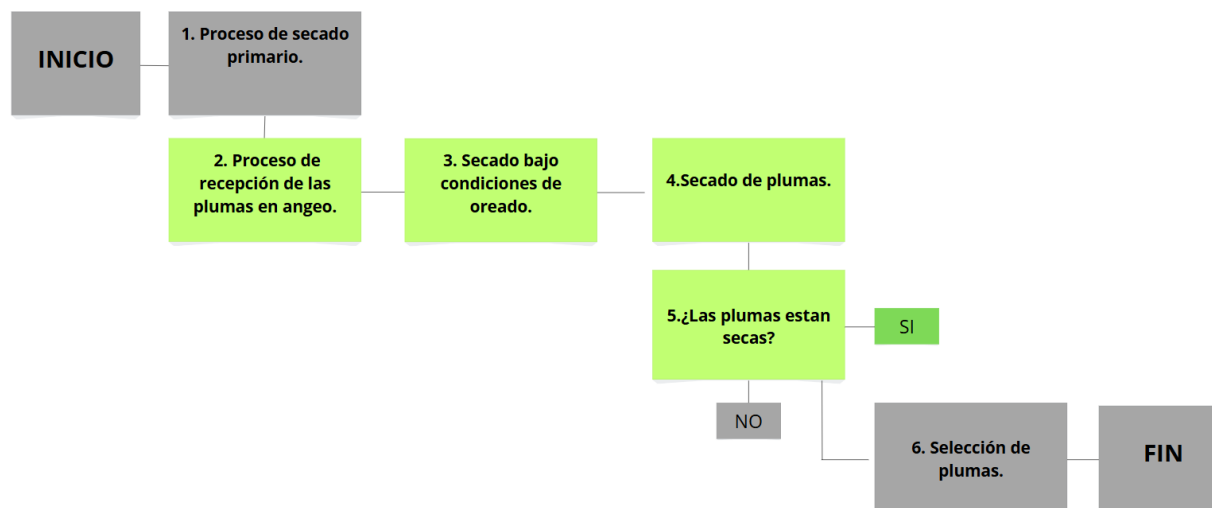


2.3 Proceso de Secado primario

Este proceso se hace un lavado a la materia prima, lavado de sanidad el cual secan las plumas húmedas para poder pasar al proceso de la hidrólisis, allí las plumas que se encuentran aún húmedas y sin partículas de sangre, se colocan las plumas en un angeo bajo condiciones de oreo. Las plumas deben estar totalmente secas antes de ingresar a la autoclave para realizar el proceso de la hidrólisis.

Figura 4

Proceso de secado primario. Elaboración propia

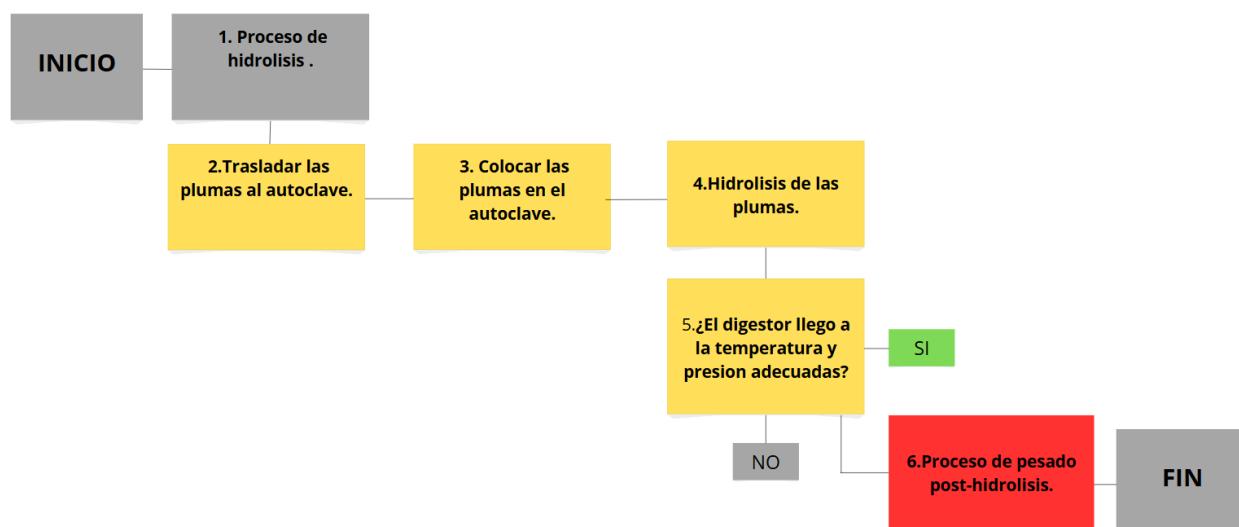


2.4 Proceso de Hidrólisis

En este periodo se someten las plumas en el autoclave a una presión de 0,15 MPa (Megapascales) y temperatura de 125°C. Primero las plumas obtenidas del secado primario se colocaron en el autoclave junto con el agua para iniciar la hidrólisis, la medida del agua en mililitros es exactamente el doble del peso de la muestra en gramos. Esta etapa tiene una duración promedio de 90 minutos dependiendo el estado de la autoclave. En cuanto a la verificación se debe estar pendiente de que la autoclave no sobrepase los 125°C de temperatura y aumente su presión relativamente para que el proceso de hidrólisis se realice correctamente.

Figura 5

Proceso de hidrólisis. Elaboración propia

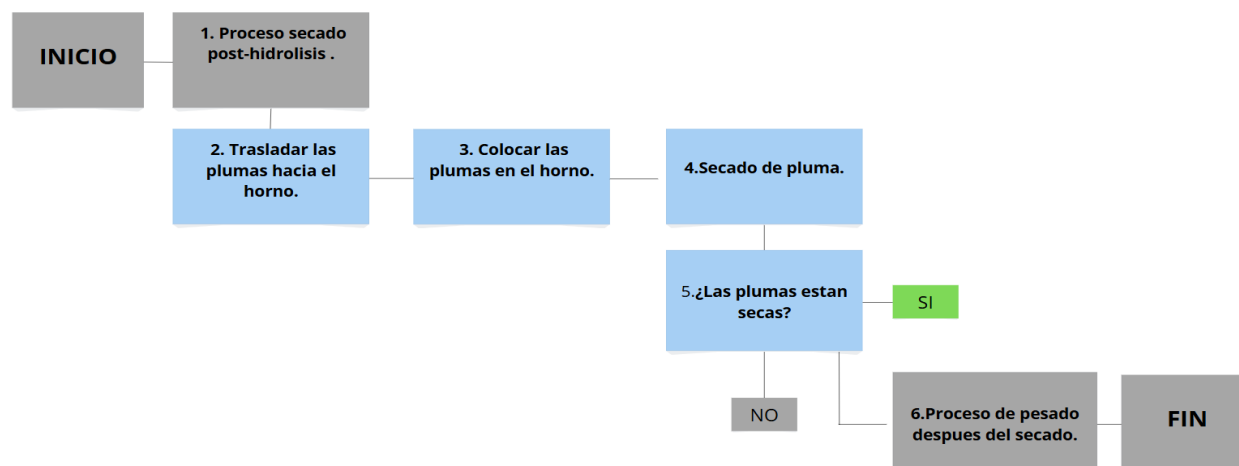


2.5 Proceso de secado post-hidrólisis

La materia prima generada en el proceso se vuelve a secar, pero esta vez mediante horno marca Hacob durante 2 a 6 horas, para eliminar la humedad y continuar con el proceso de molienda y tamizado. Hay que tener en cuenta que las plumas deben hallarse secas totalmente, antes de ingresarlas al molino eléctrico.

Figura 6

Proceso de secado post-hidrólisis. Elaboración propia

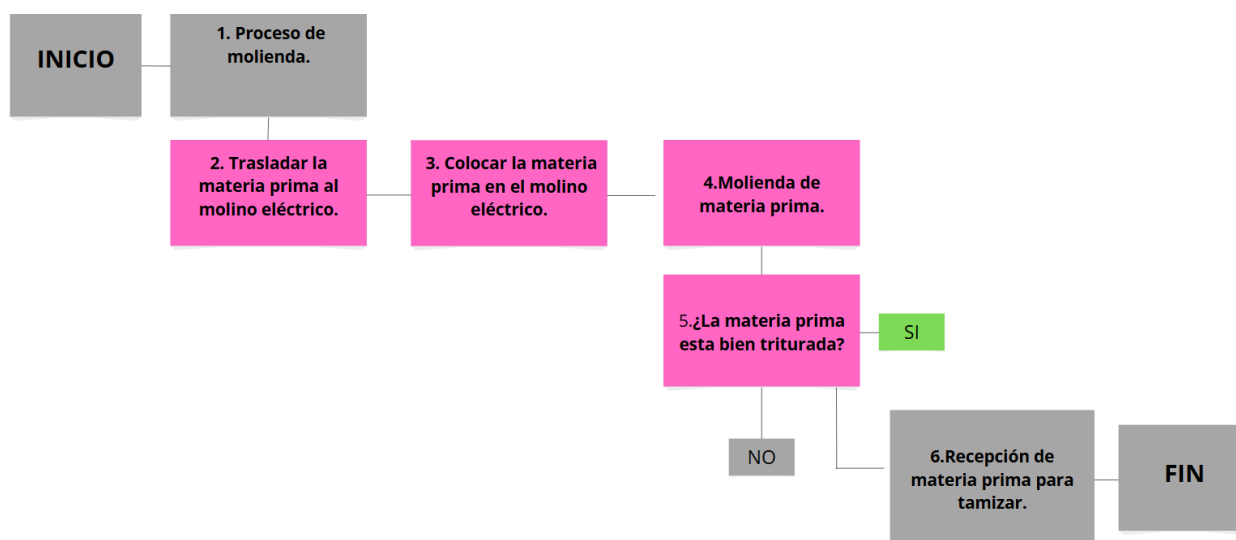


2.6 Proceso de Molienda

Durante este proceso se muele la materia prima mediante un molino marca Corona con motor eléctrico marca NBR, el proceso de molienda dura aproximadamente entre 15 y 75 minutos, dependiendo del tamaño de la muestra.

Figura 7

Proceso de molienda. Elaboración propia



2.7 Proceso de tamizado

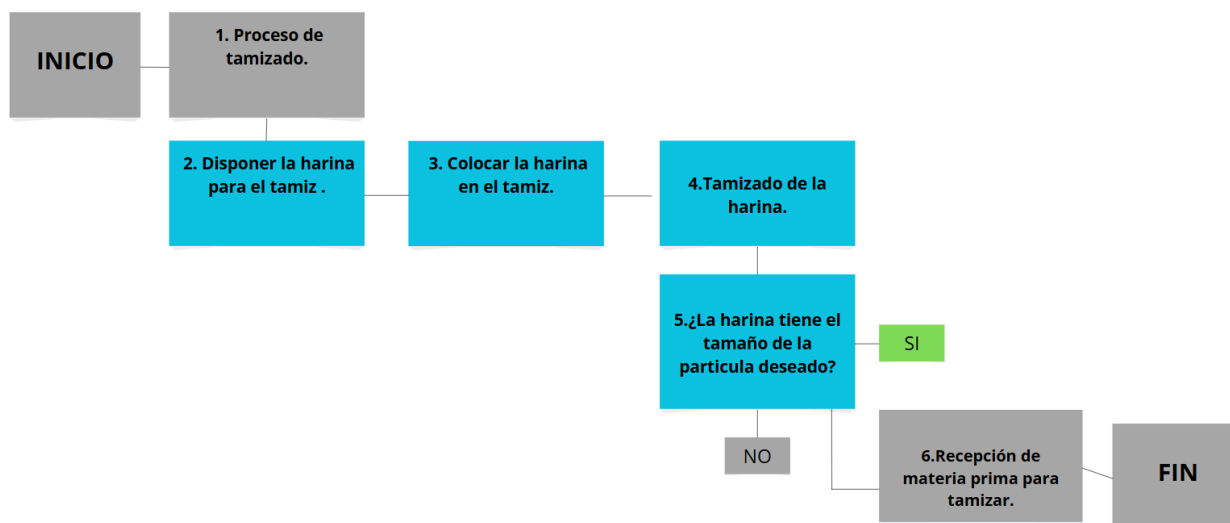
En esta etapa se tamiza la materia prima generada durante el proceso de molienda con un tamiz n°14 marca Physis, allí se logra separar el tamaño de los grumos grandes de la harina con partículas más apropiadas para el proceso. Este proceso de tamizado dura entre 40 y 90 minutos, dependiendo del tamaño de la muestra.

Una vez tamizado, el material es nuevamente pesado en el proceso de pesado post-tamizado y sometido a un análisis bromatológico, donde se evalúan sus propiedades nutricionales y calidad. Finalmente, la harina resultante es enviada al proceso de empaquetado, garantizando su correcta conservación y almacenamiento. Como resultado final, se obtuvo la harina a base de plumas. Este

proceso permite un aprovechamiento eficiente de subproductos, asegurando un producto de calidad y con valor agregado.

Figura 8

Proceso de tamizado. Elaboración propia



La harina resultante de las plumas a partir de los procesos de transformación es un insumo muy relevante para realizar alimento balanceado, debido a su alto contenido proteico, tomando como factor más importante el grado de hidrólisis (Sánchez, 2019).

2.8 Análisis bromatológico

El análisis bromatológico permite estudiar los alimentos desde el punto de vista químico, evaluando su valor nutricional y sus principales características. A través de este análisis se determina la composición de los nutrientes presentes en los alimentos, tales como la humedad, cenizas, extracto etéreo, proteína y fibra crudas (LAVET, 2015).

Una vez finalizados todos los procesos de transformación y obtenida la harina resultante, se procedió a realizar su respectivo análisis bromatológico. Este se llevó a cabo en un laboratorio

certificado, en este caso AGRO SAVIA, donde se hace el análisis proximal con el fin de identificar las propiedades nutricionales del producto final. La muestra enviada para el análisis es de 100 gr, la cual se realiza con la harina obtenida a partir de las muestras 2 y 3 del proceso.

El proceso para el análisis bromatológico, según Laboratorios Veterinarios (LAVET. 2015) es el siguiente: se presenta una muestra homogénea y representativa del lote del que es extraída (100gr), luego esta se calienta a 100°C durante más de 15 horas para determinar su humedad, y su complemento sería la cantidad de materia seca.

Después una segunda muestra es sometida a un proceso químico de digestión para identificar el nitrógeno total en forma de amonio, es decir, la proteína cruda. Una tercera muestra se somete a una extracción de sus sustancias solubles como grasas, aceites, ceras y pigmentos, o grasa cruda mediante un disolvente orgánico, éter etílico o petróleo.

A esta extracción se le somete a una digestión ácida y luego a una digestión alcalina obteniendo el porcentaje de fibra cruda. Finalmente, al restar de 100 los porcentajes obtenidos de humedad, proteína, fibra cruda, cenizas y grasa cruda se obtiene el extracto libre de nitrógeno que representa los carbohidratos solubles.

Estas pruebas nutricionales permiten caracterizar adecuadamente la harina, estandarizando la información para identificar su contenido nutricional (Proteína, fibra, cenizas, humedad y extracto etéreo).

- **Tabla 1**

Cronograma de actividades

Fase del proyecto	Actividad	Responsables	Evidencia	Materiales	Fechas (semanas)
Planeación	Revisión bibliográfica	Estudiantes	Fichas de lectura	Computador, acceso a internet	Semana 1
Cronograma	Elaboración de	Estudiantes - Asesor	Documento de planificación	Plantillas digitales (Excel, Word)	Semana 1 – 2

	cronograma y presupuesto				
Recolección	Solicitud y recolección de plumas	Estudiantes	Registro fotográfico y acta de entrega	Bolsas, guantes, vehículo	Semana 2 – 3
Procesamiento	Lavado y desinfección de plumas	Estudiantes	Hoja de control de limpieza	Agua, bicarbonato, vinagre, guantes	Semana 3 – 4
	Secado primario	Estudiantes	Registro visual	Angeo, bandejas	Semana 4
	Hidrólisis en autoclave	Estudiantes	Ficha de parámetros de proceso	Autoclave, termómetro, cronómetro, agua	Semana 4 – 5
	Secado post-hidrólisis	Estudiantes	Registro visual del producto	Horno eléctrico	Semana 5
	Molienda y tamizado	Estudiantes	Registro de molienda y tamizado	Molino, tamiz n.º 14	Semana 5 – 6
Evaluación	Análisis bromatológico	Estudiantes - AGROSAVIA	Informe de resultados del laboratorio	Muestra empacada, guía de remisión	Semana 6 – 7
Conclusión	Redacción del informe y análisis de datos	Estudiantes - Asesor	Documento final del proyecto	Computador, software de análisis de datos	Semana 7 – 8

Fuente Elaboración propia

- **Tabla 2**

Cronograma de actividades

Cronograma de actividades con los procesos de transformación

Procesos de transformación	Mes 1				Mes 2				Mes 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Planeación	X											
Recolección del residuo avícola (plumas)		X										
Procesamiento experimental			X									
Sanidad de las plumas			X									
Secado primario de las plumas				X								
Hidrólisis del subproducto					X							
Secado post-hidrólisis					X							
Molienda						X						
tamizado de la harina						X						
Evaluación del producto							X					
Análisis bromatológico							X	X	X	X		
Documentación final											X	X

Fuente Elaboración propia

● 3. Resultados

Los resultados obtenidos en el presente proyecto permitieron evaluar la viabilidad técnica de la producción de harina de plumas hidrolizada a partir de subproductos avícolas en Villavicencio, articulando cada fase metodológica con los objetivos específicos propuestos. El desarrollo del proceso inició con una etapa de planeación en la que se diseñó una ruta de transformación del residuo avícola con un enfoque de economía circular. Esta fase incluyó la revisión bibliográfica, la elaboración del cronograma, la definición de materiales y recursos necesarios, y el diseño detallado del proceso de producción, lo cual dio cumplimiento al primer objetivo específico: diseñar un proceso de producción de harina de plumas eficiente y sostenible.

Posteriormente, en la fase de recolección y preparación del subproducto, se obtuvieron 23 kilogramos de plumas provenientes de una planta de beneficio. Estas plumas fueron sometidas a un proceso riguroso de limpieza y desinfección utilizando agua, bicarbonato de sodio y vinagre, seguido de un secado primario por oreado, lo que permitió obtener una materia prima inocua y lista para su transformación. Este paso fue fundamental para asegurar la calidad del producto final y garantizar la inocuidad en el proceso de hidrólisis.

Durante la fase experimental se elaboraron seis muestras distintas (M1 a M6), manipulando las variables críticas del proceso: tiempo de hidrólisis, tiempo de secado post-hidrólisis, duración de la molienda y tiempo de tamizado. El objetivo fue identificar cuáles combinaciones de estos parámetros ofrecían el mayor rendimiento de harina, de acuerdo con el tercer objetivo específico del proyecto. Los porcentajes de rendimiento obtenidos variaron entre el 8,5% (Muestra 1) (ver tabla 6) y el 22,6% (Muestra 6) (ver tabla 11), con un promedio general de 13,05%. Estos valores indican que, a partir de los 23 kg de plumas recolectadas, se generaron aproximadamente 3,001 kg de harina, lo que valida la efectividad del modelo propuesto.

La Muestra 6 (ver tabla 11) destacó como la más eficiente, debido a un balance adecuado entre tiempos de hidrólisis (90 minutos), secado (300 minutos), molienda (15 minutos) y tamizado (40 minutos), demostrando que la combinación óptima de estas variables mejora significativamente la conversión del residuo en producto útil. Por el contrario, tratamientos como el de la Muestra 1, con un tiempo excesivo de hidrólisis (112 minutos), obtuvieron el menor rendimiento, evidenciando que esta etapa debe controlarse cuidadosamente para evitar una sobre transformación del material.

Para evaluar la calidad nutricional del producto, se realizó un análisis bromatológico a la harina obtenida (ver tabla 14), cuyos resultados revelaron un contenido de proteína cruda de 78,88 g/100 g, humedad de 8,12 g/100 g, grasa cruda de 2,78 g/100 g, cenizas de 2,40 g/100 g y fibra cruda de 0,82 g/100 g. Estos valores confirman que la harina de plumas hidrolizada cumple con los estándares nutricionales para su uso como suplemento proteico en la alimentación animal, logrando con ello el cumplimiento del segundo objetivo específico: determinar la calidad nutricional del producto y compararla con estudios retrospectivos.

Finalmente, se efectuó un análisis económico del proceso que arrojó un costo total de \$246.897 COP, incluyendo transporte, consumo energético de los equipos empleados (autoclave, horno, molino) y el análisis de laboratorio. Este valor demuestra que el proceso es económicamente viable, especialmente si se ejecuta con apoyo institucional o en sistemas productivos que ya cuenten con parte de la infraestructura básica. Este resultado aporta a la evaluación del objetivo general del proyecto, al demostrar que es posible transformar un residuo orgánico en un producto de alto valor agregado mediante un proceso accesible, replicable y ambientalmente responsable.

En síntesis, el proyecto logró cumplir con todos los objetivos propuestos. Se diseñó un proceso técnico adecuado, se comprobó la calidad nutricional del producto final y se identificaron las condiciones operativas más eficientes, consolidando una propuesta viable para la valorización de residuos avícolas bajo los principios de la economía circular.

- **Tabla 3**

Subproductos del pollo, balance mensual.

Subproducto	Cantidad (kg)
Cabezas, patas y partes de pollo	2,246 kg
Desechos tipo B	902 kg
Desperdicio de pollo	1,334 kg
Grasas de pollo	380 kg
Lodos	17,420 kg
Pluma	45,163 kg
Sangre	18,924 kg
Tripa de pollo	35,549 kg

Fuente Elaboración propia. Se realiza teniendo en cuenta la información suministrada por la planta de beneficio.

La tabla presenta los subproductos en peso (Kg) del mes de julio el cual muestra los diferentes subproductos que separa la planta de beneficio de pollos. Esta información permite evaluar la cantidad de residuos generados y su posible aprovechamiento en otros procesos productivos.

- **Tabla 4**

Pollos sacrificados durante el mes.

Descripción	Cantidad
Pollos sacrificados en julio	243,171
Pollos sacrificados el 2 de julio	3,920
Pluma recolectada	23 kg

Fuente Elaboración propia. Se hace teniendo en cuenta la información suministrada por la planta de beneficio.

Esta tabla muestra la cantidad de pollos sacrificados en la planta durante el mes de julio, con un total de 243.171. Y con 3.920 sacrificados el 2 de julio, de los cuales se generan los 23 kilos de pluma recolectada. Siendo este el insumo base para la transformación de pluma a harina como suplemento alimenticio animal se somete a diferentes procesos para su transformación.

Las plumas recolectadas en la planta se les hace un lavado de sanidad e inocuidad para eliminar residuos restantes, evitar contaminaciones e iniciar su disposición para el proceso de transformación.

- **Tabla 5**

Muestra 1.

Muestra 1	
Condición	Residuo inocuo y listo para su procesamiento
Peso (gr)	200 gr de pluma
Color	Blanco característico
Temperatura hidrólisis (°C)	125
Presión hidrólisis (MPa)	0,15
Tiempo hidrólisis (min)	112
Peso (pluma) hidrolizada y húmeda (gr)	570
Peso (pluma) secado (gr)	190
Temperatura secado post- hidrólisis (°C)	120
Tiempo secado post-hidrólisis (min)	120
Condición de secado	Mediante horno
Molienda (min)	30
Tamizado (min)	55, tamiz n°14
Peso final (gr)	17
Porcentaje de rendimiento (%)	8,5

Fuente Elaboración propia

La Muestra 1 inicialmente tiene un peso de 200 gr en seco y un color blanco característico. El proceso comienza con una hidrólisis a 125°C y una presión de 0,15 MPa durante 112 minutos, lo que

resulta en un peso de 570 gr de pluma húmeda. Luego, se lleva a cabo un secado post-hidrólisis, primero con una deshidratación por 40 horas en una zona de deshidratación y luego en horno durante 2 horas a 120°C, lo que reduce el peso a 190 gr en seco. Después, la muestra es molida durante 30 minutos y tamizada por 1 hora con el tamiz N°14, lo que resulta en un peso final de 17 gr, siendo el porcentaje de rendimiento de esta muestra de 8,50%.

- **Tabla 6**

Muestra 2.

Muestra 2	
Condición	Residuo inocuo y listo para su procesamiento
Peso (gr)	465
Color	Blanco característico
Temperatura hidrólisis (°C)	12
Presión hidrólisis (MPa)	0,15
Tiempo hidrólisis (min)	105
Peso (pluma) hidrolizada y húmeda (gr)	1192
Peso (pluma) secado (gr)	416
Temperatura secado post- hidrólisis (°C)	120°c
Tiempo secado post-hidrólisis (min)	360
Condición de secado	Mediante horno
Molienda (min)	75
Tamizado (min)	90, tamiz n°14
Peso final (gr)	45,5
Porcentaje de rendimiento (%)	9,80

Fuente Elaboración propia

El proceso de tratamiento de la Muestra 2, un residuo inocuo listo para su procesamiento comienza con un peso inicial de 465 g en seco y un color blanco característico. En el proceso de

hidrólisis, se aplican condiciones de 125°C y 0,15 MPa durante 105 minutos, obteniendo un peso de 1192 gr en estado húmedo. Posteriormente, la muestra es sometida a un secado natural en un sitio deshidratador estructurado, lo que reduce su peso a 416 gr. Luego, se realiza un secado post-hidrólisis a 120°C durante 6 horas en horno. La muestra luego es molida durante 1 hora y tamizada por 75 minutos con el tamiz N°14 y llega un peso final de 45,5 gr, siendo el porcentaje de rendimiento de esta muestra de 9,80%.

- **Tabla 7**

Muestra 3.

Muestra 3	
Condición	Residuo inocuo y listo para su procesamiento
Peso (gr)	400
Color	Blanco característico
Temperatura hidrólisis (°C)	125
Presión hidrólisis (MPa)	0,15
Tiempo hidrólisis (min)	105
Peso (pluma) hidrolizada y húmeda (gr)	963
Peso (pluma) secado (gr)	372
Temperatura secado post- hidrólisis (°C)	120
Tiempo secado post-hidrólisis (min)	360
Condición de secado	Mediante horno
Molienda (min)	75
Tamizado (min)	90, (tamiz n°14)
Peso final (gr)	54
Porcentaje de rendimiento (%)	13,5

Fuente Elaboración propia

El proceso de tratamiento de la Muestra 3 comienza con un peso inicial de 400 gr en seco y un color blanco característico. Durante la hidrólisis, se aplican condiciones de 125°C y 0,15 MPa durante

105 minutos, resultando en un peso de 963 gr en estado húmedo. A continuación, la muestra es sometida a un secado natural en un sitio deshidratador estructurado, donde reduce su peso a 372 gr. Luego, se realiza un secado post-hidrólisis a 120°C durante 6 horas en horno. La muestra es molida durante 60 minutos y tamizada durante 75 minutos con el tamiz N°14, obteniendo un peso final de 54 gr. Siendo el porcentaje de rendimiento de esta muestra de 13,50%.

- **Tabla 8**

Muestra 4.

Muestra 4	
Condición	Residuo inocuo y listo para su procesamiento
Peso (gr)	220
Color	Blanco característico
Temperatura hidrólisis (°C)	125
Presión hidrólisis (MPa)	0,15
Tiempo hidrólisis (min)	102
Peso (pluma) hidrolizada y húmeda (gr)	996,1
Peso (pluma) secado (gr)	198
Temperatura secado post- hidrólisis (°C)	120
Tiempo secado post-hidrólisis (min)	360
Condición de secado	Mediante horno
Molienda (min)	30
Tamizado (min)	50, tamiz n°14
Peso final (gr)	25
Porcentaje de rendimiento (%)	11,37

Elaboración propia

El proceso de tratamiento de la Muestra 4 comienza con un peso inicial de 220 gr en seco y un color blanco característico. La hidrólisis se realiza a 125°C con una presión de 0,15 MPa durante 102 minutos, obteniendo un peso de 996,1 gr en estado húmedo. Luego, la muestra es sometida a un secado

natural en un sitio deshidratador estructurado, donde reduce su peso a 198 gr. Posteriormente, se realiza un secado post-hidrólisis a 120°C durante 6 horas en horno. La muestra es molida durante 30 minutos y tamizada por 50 minutos con el tamiz N°14, donde obtiene un peso final de 25 gr. Siendo el porcentaje de rendimiento de esta muestra de 11,37%.

- **Tabla 9**

Muestra 5.

Muestra 5	
Condición	Residuo inocuo y listo para su procesamiento
Peso (gr)	80
Color	Blanco característico
Temperatura hidrólisis (°C)	125°
Presión hidrólisis (MPa)	0,15
Tiempo hidrólisis (min)	80
Peso (pluma) hidrolizada y húmeda (gr)	139
Peso (pluma) secado (gr)	70
Temperatura secado post- hidrólisis (°C)	120
Tiempo secado post-hidrólisis (min)	240
Condición de secado	Mediante horno
Molienda (min)	15
Tamizado (min)	40, tamiz n°14
Peso final (gr)	10
Porcentaje de rendimiento (%)	12,5

Elaboración propia

El proceso de tratamiento de la Muestra 5 comienza con un peso inicial de 80 gr en seco y un color blanco característico. La hidrólisis se realiza a 125°C con una presión de 0,15 MPa durante 80 minutos, obteniendo un peso de 139 gr en estado húmedo. Luego, la muestra es sometida a un secado natural en un sitio deshidratador estructurado, donde reduce su peso a 70 gr. Posteriormente, se realiza

un secado post-hidrólisis a 120°C durante 4 horas en horno. La muestra es molida durante 15 minutos y tamizada por 40 minutos con el tamiz N°14, donde se obtiene un peso final de 10 gr. Siendo el porcentaje de rendimiento de esta muestra de 12,50%.

- **Tabla 10**

Resultados Muestra 6.

Muestra 6	
Condición	Residuo inocuo, seco y listo para su procesamiento
Peso (gr)	115
Color	Blanco característico
Temperatura hidrólisis (°C)	125
Presión hidrólisis (MPa)	0,15
Tiempo hidrólisis (min)	80
Peso (pluma) hidrolizada y húmeda (gr)	230
Peso (pluma) secado (gr)	95
Temperatura secado post - hidrólisis (°C)	120
Tiempo secado post-hidrólisis (min)	300
Condición de secado	Mediante horno
Molienda (min)	15
Tamizado (min)	40, tamiz n°14
Peso final (gr)	26
Porcentaje de rendimiento (%)	22.6

Fuente Elaboración propia.

El proceso de tratamiento de la Muestra 6, un residuo inocuo listo para su procesamiento comienza con un peso inicial de 115 gr en seco y un color blanco característico. La hidrólisis se realiza a 125°C con una presión de 0,15 MPa durante 1 hora y 20 minutos, obteniendo un peso de 230 g en estado húmedo. Posteriormente, la muestra es sometida a un secado natural en un sitio deshidratador estructurado, donde reduce su peso a 95 g. Luego, se realiza un secado post-hidrólisis a 120°C durante 5

horas en horno. La muestra es molida durante 15 minutos y tamizada por 40 minutos con el tamiz N°14, donde se obtiene un peso final de 26 gr. Siendo el porcentaje de rendimiento de esta muestra de 22,6%, siendo esta muestra la que genera el mayor porcentaje de rendimiento.

- **Tabla 11**

Variables de las muestras.

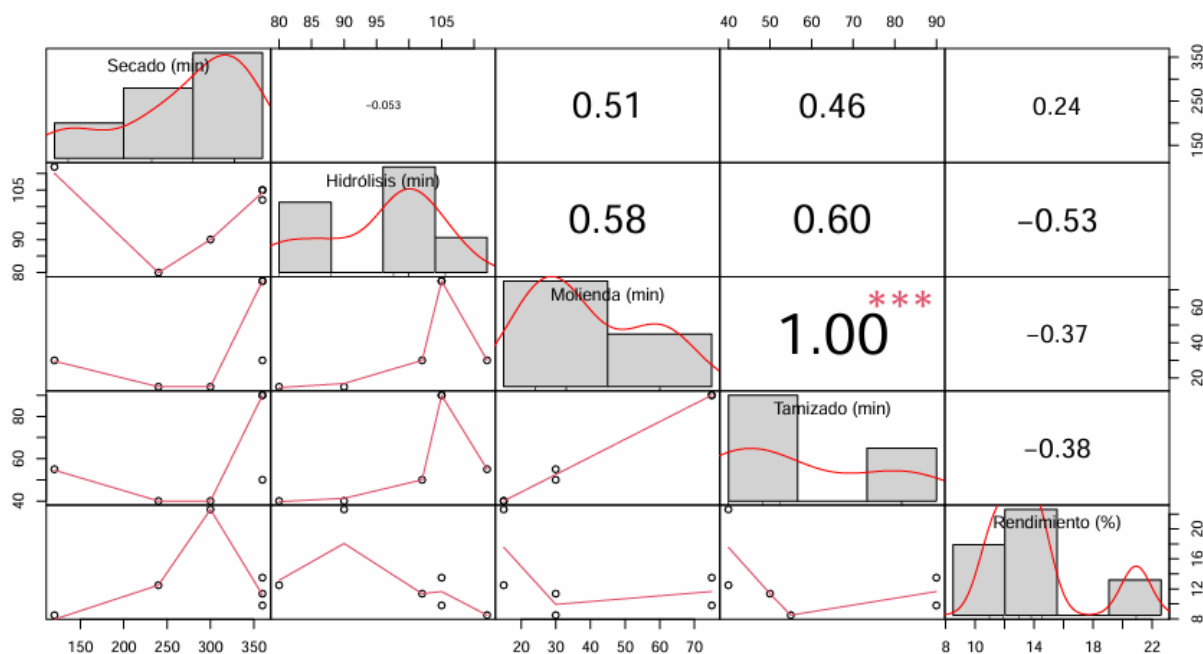
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Tiempo de hidrólisis (min)	112	105	105	102	80	90
Tiempo secado post-hidrólisis (min)	120	360	360	360	240	300
Tiempo de molienda (min)	30	75	75	30	15	15
Tiempo de tamizado (min)	55	90	90	50	40	40
Porcentaje de rendimiento (%)	8.5	9.8	13.5	11.37	12.5	22.6

Elaboración propia

Esta tabla nos indica la comparación de las 4 variables con los datos de cada muestra y su rendimiento en la parte inferior.

Figura 9

Matriz de correlación de Pearson. Elaboración propia



De igual manera, según la matriz de correlaciones de Pearson, evidenció que no hay relación significativa del porcentaje de rendimiento en función de ninguna de las variables medidas, por lo que el porcentaje de rendimiento diferencial entre las muestras evaluadas podría deberse a otros factores que no se tuvieron en cuenta en este experimento, sin embargo, se determinó una correlación significativa entre la molienda y el tamizado, debido a una correlación metodológica.

- **Tabla 12**

Promedio de rendimiento.

Promedio de muestras según porcentajes de rendimiento		
# Muestra	peso (g) gramos	Porcentaje
Muestra 1	200	8,50%
Muestra 2	465	9,80%
Muestra 3	400	13,50%
Muestra 4	220	11,37%
Muestra 5	80	12,50%
Muestra 6	115	22,60%
Promedio de rendimientos		13,05%

Elaboración propia

La tabla anterior de promedio de rendimiento indica un promedio total de las muestras con un porcentaje de rendimiento aproximado de 13.05%.

- **Tabla 13**

Rendimiento total. Elaboración propia.

Rendimiento total pluma recolectada		
Pluma recolectada	Harina generada	Porcentaje de rendimiento promedio
23 kg	3.001 kg	13,05%

Según este porcentaje de rendimiento promedio y teniendo en cuenta que la recolección total de plumas es de 23 kilos, se da como resultado que se puede generar aproximadamente 3.001 gr de harina a partir de la cantidad total de pluma recolectada y suministrada por la planta de beneficio, tal como se muestra en la tabla 14.

- **Tabla 14**

Resultados de Análisis bromatológico AGROSAVIA.

Determinación Analítica	Unidad	Método	Valor
Determinación de humedad	g/100g	ISO 6496:2009 NTC 4888:2000	8.12
Determinación de ceniza	g/100g	AOAC 942.05, Ed. 22nd, 2023	2.40
Determinación de extracto etéreo	g/100g	AOAC 2003.06, Ed. 22nd, 2023	2.78
Determinación de proteína cruda	g/100g	AOAC 960.52, Ed. 22nd, 2023	78.88
Determinación de fibra cruda	g/100g	GA-R-40 Determinación de fibra cruda en alimentos para animales, versión 4	0.82

Elaboración propia. Se realiza con base a los resultados de análisis bromatológico llevado a cabo por AGRO SAVIA

La tabla muestra los resultados del análisis bromatológico realizado a la harina de plumas, indicando la concentración de humedad, cenizas, grasa, proteína y fibra crudas, expresadas en g por cada 100 g de producto (g/100 g).

- **Tabla 15**

Determinación analítica de resultados.

Humedad	8,12g	100 g
Cenizas	2,40g	100 g
Grasa	2,78g	100 g
Proteína cruda	78,80g	100 g
Fibra cruda	0,82g	100 g

Fuente Elaboración propia

Estos resultados evidencian un alto contenido de proteína cruda en la harina de plumas, con bajos niveles de humedad, grasa y fibra cruda. La harina de plumas analizada presenta un contenido proteico cercano al 80% considerando que la queratina es la mayor conformación que tiene, lo cual la convierte en una fuente significativa de proteína para la formulación de dietas animales.

El bajo contenido de humedad (8,12 g/100 g) contribuye a la estabilidad del producto, minimiza el crecimiento de microorganismos y prolonga su vida útil. Además, la presencia de grasa (2,78 g/100 g) y fibra cruda (0,82 g/100 g) en niveles reducidos favorece la concentración de proteínas. Por su parte, el porcentaje de cenizas (2,40 g/100 g) indica la presencia de minerales en los que puede considerarse Ca, P, Zn, Cu que pueden ser beneficiosos en la nutrición animal. El uso de métodos analíticos estandarizados (ISO, AOAC, NTC) respalda la confiabilidad de los resultados, al cumplir con protocolos internacionalmente reconocidos.

4. Discusión

El análisis bromatológico (ver tabla 14) complementa la evaluación del proceso al evidenciar que, independientemente del rendimiento de cada muestra, la harina de plumas obtenida conserva un alto contenido proteico (78,88%), con bajos niveles de humedad (8,12%), grasa (2,78%) y fibra cruda (0,82%). Estos resultados demuestran que el producto cumple con las condiciones nutricionales necesarias para ser considerado como suplemento alimenticio pecuario, lo cual valida la hipótesis central del proyecto. Además, la baja humedad favorece la estabilidad y vida útil del producto, mientras que la reducción de grasa y fibra implica una mayor concentración de proteína utilizable. Estos datos son consistentes con literatura técnica y refuerzan la idea de que la harina obtenida puede ser funcionalmente equivalente o superior a otras fuentes proteicas de origen animal.

Finalmente, los resultados del análisis económico, donde se estimó un costo total de \$246.897 COP para el procesamiento completo de 23 kilogramos de pluma. Considerando que los insumos fueron

mayoritariamente suministrados por la planta de beneficio y la universidad, y que los costos se concentran principalmente en el análisis bromatológico, se concluye que el proceso puede escalarse económicamente, especialmente si se cuenta con infraestructura propia. Esta factibilidad técnica y económica respalda el propósito general del proyecto: demostrar la viabilidad de transformar un residuo avícola en un insumo nutricional útil, dentro del marco de un modelo de economía circular.

- **Tabla 17**

Tabla comparativa de los resultados con los de otros autores.

	Resultados propios (%)	Rofner. N. & Reategui D. (2019) Pluma (%)	Alzamora et. al (2018) Pluma hidrolizada (%)	Benítez et. al (2014) Pluma (%)	FEDNA (2012) Pluma hidrolizada (%)	Chaparro (2020) Pluma hidrolizada (%)
Humedad	8,12	-	7,5	4,9	6,8	8
Ceniza	2,4	2,74	7,41	3,28	2,2	1,46
Grasas	2,78	6,39	1	1,4	1,8	0,16
Proteína	78,88	81,7	84,1	77,7	83,9	86,29
Fibra	0,82	-	-	10,05	-	1,42

Fuente Elaboración propia. Elaborada en base a datos de resultados de los autores (Florida & Reategui. 2019), (Alzamora et. al. 2018), (Benítez et. al. 2014), (FEDNA. 2012), (Chaparro. 2020)

Al comparar los resultados obtenidos con los de Alzamora et al. (2018), se observa que tienen valores similares de humedad (8,12% y 7,5%), indicando que ambos métodos de secado son eficaces (digestor industrial y horno). En cuanto a las cenizas, (2,4) marcan diferencia frente al 7,41, teniendo en

cuenta de que lo máximo en este aspecto es 2.2 (0,2 diferencia). En contenido de grasa están bajo parámetros adecuados ambos proyectos (2,78% y 1%); ya que lo máximo es 6 en este aspecto. En cuanto a la proteína, este autor tuvo un mayor resultado, teniendo en cuenta que el proceso completo lo hace por medio de digestor industrial y con 3 bares de presión, 100°C de temperatura durante 90 minutos para la hidrólisis y 280°C en secado durante 40 minutos, obteniendo así un porcentaje superior de 84,1% de proteína. Además, el proceso de tamizado lo realiza con tamiz vibratorio industrial, que, dependiendo del nivel de granulometría exigido, el tamiz vibratorio puede tener de uno a tres tamices de diferente micraje. (Cuccolini, 2008)

En cuanto a los resultados comparado con los de FEDNA (2012) se ve que (8,12% de humedad), ligeramente superior al 6,8% reportado por FEDNA, pero sigue dentro de rangos aceptables para harinas proteicas (<10). En cuanto a las cenizas los valores son muy cercanos (2,40% vs. 2,2%), lo que indica que el proceso de limpieza y desinfección es efectivo. En contenido de grasa los resultados muestran un ligero aumento (2,78%) frente al 1,8% de FEDNA (2012); pero estando ambos bajo cifras adecuadas en este aspecto (<6). En cuanto a la proteína, FEDNA (2012) reporta un mayor contenido proteico (83,9%), mientras que el resultado propio es de 78,88%. Teniendo en cuenta que este autor realiza la hidrólisis con presión aumentada de 3,2 atm, a una temperatura de 146°C durante 30 minutos, aumentando su extracción de proteína. Los resultados en cenizas y humedad son cercanos a FEDNA, lo que valida el método de limpieza y secado. La proteína es ligeramente menor, posiblemente por condiciones menos industrializadas en la hidrólisis. Pero realizando ajustes en tiempo, presión y temperatura de hidrólisis podríamos mejorar el rendimiento proteico.

En cuanto los resultados comparados con los de Chaparro (2020), se ve que los propios (8,12% de humedad), son casi idénticos al del autor (8%), lo que indica que ambos procesos logran un secado eficiente. La diferencia mínima (0,12%) podría deberse a variaciones en los tiempos, presión y

temperatura del proceso completo en hidrólisis y secado. Si este indicador es inferior a 8%, está bajo parámetros, pero si, por el contrario, el valor es alto, quiere decir que le falta más secado, por lo cual se debe dejar un tiempo más prolongado la harina en el secador (Chaparro. 2020).

En cuanto a las cenizas los resultados arrojan que el valor es un poco mayor (2,4%), lo que indica mayor contenido mineral residual en las plumas, contrastando las diferencias en el lavado o fuente de materia prima. En el contenido de grasa hay una gran diferencia (2,78% vs. 0,16%), ya que Chaparro (2020), realiza la hidrólisis con protocolos y máquina industrial con presión superior de 60 psi, a una temperatura de 120°C durante 1 hora, secado con temperatura de 98 a 100 °C y presión de 60 a 70 PSI durante 1 hora, teniendo en cuenta que 1 MPa es equivalente a 145,038 PSI; es decir que los 0,15 MPa son igual a 21,75 PSI. Todo este proceso industrial con tiempos controlados marcó diferencia en los resultados; ya que Chaparro (2020) es el autor que obtuvo mayor contenido de proteína (86,29%) y parámetros más acordes.

En general, en cuanto a la humedad, los resultados están bajo parámetros adecuados del producto para harinas proteicas (8.12). Ya que, durante el secado se debe realizar disminución de la humedad hasta porcentajes menores o iguales al 10%. (Parzanese M., 2018). Por otro lado, el resultado de contenido de cenizas se encuentra dentro de los rangos establecidos (2.4), ya que su concentración media en cenizas es de un 2,2% y el contenido alto de estas es un indicador de presencia de arena o fraude, por lo tanto, no debe superar el 3,4% (FEDNA. 2012).

De igual manera, la harina de plumas tiene un escaso contenido en carbohidratos, pero su nivel de grasa es apreciable (6%), el dato es de 2.78, por lo tanto, se encuentra dentro de los rangos establecidos. El dato de proteína obtenido, aunque menor (78,88%), podría potenciarse usando métodos y herramientas más industriales y precisas para generar un mejor porcentaje de este nutriente

presente en la harina a base de plumas. ya que el concentrado proteico que debe tener la harina de plumas es entre (81-86% PB) (FEDNA. 2012)

Al integrar todas las comparaciones (FEDNA, Alzamora, Benítez, Florida & Reátegui, Chaparro), se destaca que el proceso supera en fibra y cenizas a varios estudios, así mismo se requiere de ajustes en los procesos para igualar los niveles proteicos industriales.

Como se indicó anteriormente, según la matriz de correlaciones de Pearson, evidenció que no hay relación significativa del porcentaje de rendimiento en función de ninguna de las variables medidas, por lo que el porcentaje de rendimiento diferencial entre las muestras evaluadas podría deberse a otros factores que no se tuvieron en cuenta en este experimento, sin embargo, se determinó una correlación significativa entre la molienda y el tamizado, debido a una correlación metodológica.

En general, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros establecidos, en el caso de la proteína y el rendimiento, se puede mejorar el proceso con una herramienta más avanzada o tipo industrial para perfeccionar todo con presión, tiempos y temperaturas controladas. De igual manera, los rendimientos realizados con equipos industriales o mejores tecnologías, aumentan con estos métodos más especializados.

5. Conclusiones

La ejecución del proyecto permitió demostrar que la producción de harina de plumas hidrolizada a partir de residuos del sector avícola es técnica, nutricional y económicamente viable en el contexto local de Villavicencio, cumpliendo con los objetivos planteados y validando cada una de las fases metodológicas establecidas.

En primer lugar, con respecto al objetivo general, se logró evaluar la viabilidad técnica de la producción de harina de plumas hidrolizada bajo condiciones controladas, evidenciando que este subproducto, comúnmente descartado, puede ser transformado mediante procesos sencillos en un insumo útil para la industria pecuaria. Las fases de recolección, limpieza, hidrólisis, secado, molienda y tamizado se llevaron a cabo con éxito, permitiendo recuperar un 13,05% del peso inicial de plumas recolectadas en forma de harina de alta calidad.

En cuanto al primer objetivo específico, relacionado con el diseño de un proceso de producción eficiente y sostenible, se estructuró un modelo técnico integral que abarcó todas las etapas necesarias para la transformación del residuo avícola. La planificación detallada del proceso, el uso de equipos accesibles y el enfoque sanitario aplicado desde la fase inicial de tratamiento del subproducto garantizan que este modelo puede ser replicado por pequeños o medianos productores con recursos limitados, fomentando prácticas de economía circular.

Respecto al segundo objetivo específico, que consistía en determinar la calidad nutricional de la harina obtenida, el análisis bromatológico realizado a las muestras finales arrojó un contenido de proteína cruda del 78,88%, junto con bajos niveles de humedad, grasa y fibra cruda. Estos valores respaldan el potencial de la harina de plumas como suplemento proteico en la formulación de alimentos balanceados para animales, especialmente en sistemas intensivos de producción, donde la eficiencia nutricional es clave. Este resultado valida el uso del subproducto como alternativa sostenible a otras fuentes proteicas de mayor costo o menor disponibilidad.

En relación con el tercer objetivo específico, orientado a identificar las condiciones operativas más eficientes dentro del proceso de transformación, los resultados muestran que variables como el tiempo de secado y la duración de la molienda tienen un impacto significativo en el rendimiento del producto final. La Muestra 6, con un rendimiento del 22,6%, demostró que una hidrólisis moderada, acompañada de un secado suficiente y tiempos equilibrados de molienda y tamizado, optimiza la

conversión de plumas en harina. Este hallazgo resalta la importancia de estandarizar parámetros técnicos para maximizar la eficiencia del proceso y reducir pérdidas.

Desde una perspectiva económica, el proyecto también evidenció que los costos de producción son razonables, siendo el análisis bromatológico el componente más costoso del proceso. Con un total de \$246.897 COP invertidos en todo el ciclo de producción, el proceso puede considerarse una opción económicamente viable, especialmente en contextos donde se dispone del subproducto y parte de la infraestructura, como plantas de beneficio o asociaciones de productores avícolas.

En conclusión, la investigación valida que es posible transformar un residuo orgánico subutilizado en un recurso de alto valor agregado, con beneficios nutricionales, económicos y ambientales. La harina de plumas hidrolizada no solo representa una solución técnica para la gestión de residuos avícolas, sino también una alternativa práctica para fortalecer la sostenibilidad del sector agropecuario desde un enfoque de economía circular.

- Anexos



(Figura 10. Recolección) (Figura 11. Lavado) (Figura 12. Desinfección) (Figura 13. Desinfección)



(Figura 14. Selección) (Figura 15. Secado primario) (Figura 16. Pluma en autoclave) (Figura 17. hidrólisis)



(Figura 18. Horno de secado) (Figura 19. pluma hidrolizada) (Figura 20. pesado post-hidrólisis) (Figura 21. tamiz)



(Figura 22. tamizado) (Figura 23. pesado de muestra) (Figura 24. muestra 100gr)

- **Figura 10. Recolección**

- ✓ En esta imagen se registra la recolección de plumas en la planta de beneficio avícola.

Esta actividad constituye la fase inicial del proceso, donde se recolectan 23 kg de plumas, que serán utilizados como materia prima para la transformación en harina. Se asegura que el material esté en condiciones higiénicas adecuadas para su procesamiento.

- **Figura 11. Lavado**

- ✓ La fotografía muestra el primer lavado de las plumas utilizando agua potable. Este paso es necesario para remover residuos visibles como sangre, tierra o materia orgánica adherida, asegurando un punto de partida limpio para el tratamiento sanitario posterior.

- **Figura 12. Desinfección**

- ✓ Aquí se evidencia el tratamiento de desinfección con bicarbonato de sodio al 5% disuelto en agua. Esta etapa busca eliminar agentes patógenos presentes en la superficie de las plumas, reforzando la inocuidad del producto antes de pasar al secado.

- **Figura 13. Desinfección**

- ✓ Complementando el proceso anterior, en esta imagen se observa la aspersion de una solución de vinagre diluido al 5%, como parte del protocolo de sanidad. Esta acción contribuye a neutralizar microorganismos y estabilizar el material biológico antes de su secado.

- **Figura 14. Selección**

- ✓ En esta figura se realiza la selección manual de plumas en buen estado, descartando aquellas que se encuentren deterioradas o contaminadas. Este paso garantiza la calidad del insumo a utilizar en el proceso de transformación.

- **Figura 15. Secado primario**

- ✓ La imagen muestra el secado de las plumas sobre una malla tipo anejo bajo condiciones ambientales. Este secado natural permite reducir la humedad del material antes de someterlo al tratamiento térmico, facilitando su posterior hidrólisis.

- **Figura 16. Pluma en autoclave**

- ✓ Aquí se presenta el ingreso de las plumas al autoclave, donde serán sometidas a altas temperaturas y presión controlada. Este es un paso clave del proceso, ya que permite la descomposición parcial de la queratina contenida en las plumas.

- **Figura 17. Hidrólisis**

- ✓ La fotografía ilustra el proceso de hidrólisis en marcha dentro del autoclave, a 125 °C y 0.15 MPa. Esta etapa transforma las plumas en un material más blando y digerible, adecuado para la molienda y posterior uso como suplemento alimenticio.

- **Figura 18. Horno de secado**

- ✓ Se observa aquí el horno eléctrico utilizado para el secado post-hidrólisis. Las plumas hidrolizadas se deshidratan completamente durante varias horas, asegurando la estabilidad del producto y previniendo el desarrollo de hongos o bacterias.

- **Figura 19. Pluma hidrolizada**

- ✓ La imagen muestra el estado de las plumas una vez finalizado el proceso de hidrólisis. Se aprecia un cambio en textura y color, resultado de la acción del calor y la presión, lo que indica que el material está listo para ser molido.

- **Figura 20. Pesado post-hidrólisis**

- ✓ Esta figura registra el proceso de pesado de las plumas después de ser deshidratadas. Este paso es esencial para calcular el rendimiento del proceso y registrar los datos que alimentarán el análisis cuantitativo del proyecto.

- **Figura 21. Tamiz**

- ✓ Se muestra el tamiz metálico n.º14 utilizado para separar partículas según su tamaño. Esta herramienta permite obtener una harina más homogénea y de mejor calidad para fines de análisis bromatológico y aplicación práctica.

- **Figura 22. Tamizado**

- ✓ En esta imagen se realiza manualmente el proceso de tamizado del material molido. Aquí se separan las fracciones finas de las gruesas, obteniendo una harina con textura uniforme y adecuada para su uso en alimentos balanceados.

- **Figura 23. Pesado de muestra**

- ✓ La figura registra el pesado final de la muestra de harina obtenida tras el tamizado. Esta medición es parte del control de calidad y permite calcular el porcentaje de rendimiento de cada muestra procesada.

- **Figura 24. Muestra 100 gr**

- ✓ Finalmente, se presenta la muestra de 100 gramos de harina de pluma, lista para ser enviada al laboratorio AGROSAVIA para su análisis bromatológico. Esta muestra representa el producto final del proceso de transformación.

Tabla 18*Costos de producción de la elaboración de harina a base de plumas*

Operación	Unidad/Base de Cálculo	Costos / (\$)
Transporte y recolección del subproducto	Lote (\$)	20.000
Peso (Gramera)	Consumo de energía (\$ / kWh)	2,80
Proceso de hidrólisis (Autoclave)	Consumo de energía (\$ / kWh)	11.106
Proceso de secado (Horno)	Consumo de energía (\$/kWh)	40.666
Proceso de molienda (Motor eléctrico)	Consumo de energía (\$ / kWh)	1.383
Análisis bromatológico	Unidad (\$)	173.740
TOTAL		246.897

Fuente Elaboración propia

Finalmente, se presenta de manera voluntaria la tabla con los costos asociados a diferentes operaciones dentro de los procesos determinados, mediante el cálculo del tiempo de uso de los equipos y su consumo de energía, asimilables con el costo de esta y representada la cifra en (\$ / kWh). Esta tabla permite visualizar los costos más relevantes durante el proceso de transformación del subproducto, destacando que la mayor inversión se destina al análisis bromatológico, mientras que algunas etapas no generan costos adicionales ya que la universidad brinda los materiales y elementos para estos procesos.

- **Referencias bibliográficas**

Ahmed, M., & Khan, M. (2019). Utilization of poultry feathers as a potential source of protein. *Journal of Poultry Science*, 56(2), 123–130.

Alzamora, L. A., Mendoza, E. G., Monteza, T. D., Pastor, V. F., & Rosales, Q. F. (2018). Diseño del proceso productivo de harina a base de plumas de pollo en la empresa distribuidora avícola el galpón E.I.R.L. [Tesis de pregrado, Universidad de Piura].
<https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/bae4158d-f951-48b6-a340-3d7aae679d1c/content>

Ariza, O. A. (2018). Estudio del impacto ambiental para una granja de engorde en el municipio de Fusagasugá [Tesis de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada].
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16439/ArizaAndradeOscarAlirio2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

AVICULTORES, Federación Nacional de. (2020, julio 5). Información estadística.
<https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1538599468784-33441e59-1807>

Benítez, R., Rosero, B., & Martín, J. (2014). Evaluación de dos materias primas como fuente de proteína: pluma de pollo (*Gallus gallus*) y pezuña de vaca (*Bos primigenius taurus*). *Ingenium*, 8(22), 21–26. <https://www.researchgate.net/publication/308093094>

Bioagrícola del Llano. (2025). Capacitaciones y sensibilizaciones sobre separación en la fuente.

Disposición final de residuos sólidos.

https://www.bioagricoladelllano.com.co/disposicion_final_de_residuos_solidos

Bolívar, F. L. M. (2022, junio 2). La transformación y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en la producción y faenamiento de pollos de engorde.

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17541>

Campos, C., Martínez, P., & Ramírez, G. (2020). Evaluación del ciclo de vida de los ingredientes de los piensos: grasa de ave, harina de subproductos de aves de corral y harina de plumas hidrolizadas. Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119845>

Cervantes, G. (2021). Transitando a la economía circular en el sector agropecuario: granjas experimentales en Guanajuato, México. Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente, 7, 45–66. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202101.003>

Chaparro, F. M. (2020). Propuesta para el aprovechamiento de pluma en el desarrollo del proceso de obtención de harina de pluma hidrolizada [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/36905>

CONPES. (2005). Política nacional de sanidad agropecuaria e inocuidad de alimentos para el sistema de medidas sanitarias y fitosanitarias (CONPES 3375). Consejo Nacional de Política Económica y Social.

Cuccolini. (2008). Tamiz vibratorio vertical – Instrucciones para el uso.

[http://www.cuccolini.it/2008/\(301008121530\)Tamiz%20Vibratorio%20Vertical_ES.pdf](http://www.cuccolini.it/2008/(301008121530)Tamiz%20Vibratorio%20Vertical_ES.pdf)

De Redacción, E. (2022). Colombia: la producción de pollo crece un 7,3% en 2022. *Avicultura*.

<https://avicultura.com/colombia-la-produccion-de-pollo-crece-un-73-en-2022>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020). Encuesta de sacrificio de ganado y aves. <https://www.dane.gov.co/>

Macarthur, E. L. L. E. N., & Heading, H. E. A. D. I. N. G. (2019). How the circular economy tackles climate change. *Ellen MacArthur Found*, 1, 1-71. https://www.hoop-hub.eu/virtual_images/134-6254016ea43c113bc152bb9f06f1ec02.pdf

FAO. (2020). Manejo de los desechos avícolas. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. <https://www.fao.org/poultry-production-products/production/management-and-housing/waste-management/es/>

FENAVI. (2024). Producción nacional de pollo. *Estadísticas FENAVI*.

<https://fenavi.org/estadisticas/produccion-pollo-p/>

FENAVI. (s.f.). *Guía ambiental para el subsector avícola*. <https://fenavi.org/>

Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA). (2012). *Harina de plumas*

hidrolizada. http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/harina-de-plumas-hidrolizada-actualizada-nov-2012

- García, A., López, M., & Rodríguez, J. (2020). Evaluación de la viabilidad técnica y económica de la producción de harina de plumas hidrolizada en Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 33(2), 123–135.
- González, A., Hernández, M., & Pérez, J. (2018). Impacto ambiental de la producción avícola en Colombia. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 24(1), 45–56.
- Gupta, R., & Ramnani, P. (2006). Microbial keratinases and their prospective applications: an overview. *Applied microbiology and biotechnology*, 70, 21-33.
- Hamam, M., Ragusa, G., & Licciardello, F. (2021). Strategies for poultry waste valorization and sustainability. *Sustainability*, 13(6), 3453. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3453>
- Harvey, A. (2020). Estudio de factibilidad para optimizar la producción de harina de plumas hidrolizadas de pollo en la empresa PROCINSUR SRL [Tesis de pregrado, Universidad Católica de San Pablo]. http://repositorio.ucsp.edu.pe/bitstream/UCSP/14875/1/CHACON_MASCO_ANG_EST.pdf
- ICA. (2007). Diagnóstico de recolección de residuos sólidos en municipios de Colombia. Instituto Colombiano Agropecuario. <https://www.ica.gov.co/getattachment/05335af5-1c3e-4d2b-92cb-0ca226a8a1d0/2942.aspx>
- INVIMA. (2023). Programa Nacional de Sanidad en Reproducción y Calidad de Aves (PNSRQ AVES 2023). Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos.

<https://www.invima.gov.co/sites/default/files/alimentos-y-bebidas-alcoholicas/2023-10/PNSRQ%20AVES%202023%20..pdf>

Kim, J., & Lee, S. (2020). *Economic feasibility of producing feather meal as an alternative protein source. Journal of Agricultural Economics*, 71(3), 645–658.

LAVET. (2015). *Analizando alimentos: Los análisis bromatológicos.*

<http://www.lavet.com.mx/analizando-alimentos-analisisbromatologicos/>

López, M., Rodríguez, J., & García, A. (2020). *Producción de harina de plumas hidrolizada como alternativa nutricional para el sector avícola. Revista de Nutrición Animal*, 20(1), 15–25.

Onifade, A. A., Al-Sane, N. A., Al-Musallam, A. A., & Al-Zarban, S. (1998). *A review: potentials for biotechnological applications of keratin-degrading microorganisms and their enzymes for nutritional improvement of feathers and other keratins as livestock feed resources. Bioresource technology*, 66(1), 1-11.

ONU. 2015. *Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. Objetivos de Desarrollo Sostenible.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>

Parzanese, M. (2018). *Tecnologías para la industria alimentaria. Alimentos Argentinos.*

https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_03_Liofilizados.pdf

Patel, S., & Sharma, R. (2018). *Environmental impact assessment of poultry farming in India*. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 53, 123–135.

Presidencia de la República de Colombia. (2013). *Decreto 2981 de 2013: Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo*.

https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/decreto_2981_2013.htm

Raj, S. K., & Mukherjee, A. K. (2015). *Optimization for production of liquid nitrogen fertilizer from the degradation of chicken feather*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(4), 1–13.

<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2015.07.002>

Real Academia Española. (2017). *Diccionario de la lengua española (24.ª ed.)*.

<http://dle.rae.es/?id=UndMLnK>

Reddy, N., & Santosh, M. S. (2016). *Recovery and applications of feather proteins*. In N. Reddy (Ed.), *Sustainable Protein Sources* (pp. 255–274). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802391-4.00014-8>

Resolución 754 de 2014. *Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio*. (2014). *Por la cual se establece la metodología para la formulación, implementación y actualización de los PGIRS*.

<https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-gestion-institucional-gestion-de-residuos-solidos-pgirs-de-segunda-generacion-resolucion-754-de-2014>

Rodríguez, J., García, A., & López, M. (2019). Evaluación de la factibilidad económica de la producción de harina de plumas hidrolizada en Villavicencio. *Revista de Economía y Finanzas*, 15(2), 100–115.

Rofner, N. F. (2019). Plumas: Implicancia ambiental y uso en la industria. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(1), 11. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.480>

Rofner, N. F., & Reátegui, D. F. (2019). Compost a base de plumas de pollos (*Gallus domesticus*). *Livestock Research for Rural Development*, 31(1), #11.
<http://www.lrrd.org/lrrd31/1/nelin31011.html>

Sánchez, M. (2019, mayo 31). Diseño de una planta productora de harina de plumas de pollo para cubrir la demanda de alimentos balanceados en el cantón Santa Elena [Tesis de pregrado, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/4841>

Universidad de los Llanos. (2020). Plan de desarrollo departamental del Meta 2020–2023.
<https://www.unillanos.edu.co/>

Williams, C. (s.f.). Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo. FAO.
<https://www.fao.org/docrep/019/i3531s/i3531s05.pdf>