

Valorización de lodos residuales avícolas mediante procesos anaerobios con *L. plantarum* para la obtención de biomasa con potencial de consumo animal

Alondra Sánchez-Solano, Joaquín Estrada-García, Roger Emmanuel Sales-Pérez, Erik Samuel Rosas-Mendoza y Juan Manuel Méndez-Contreras

Laboratorio Ambiental II, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: juan.mc@orizaba.tecnm.mx; Tel.: (+52) 272 111 5889

Desarrollo Sustentable (Bioprocesos)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 28 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.517>

Resumen: El presente estudio aborda la problemática ambiental derivada de la generación de lodos residuales por la industria avícola, los cuales representan una fuente significativa de contaminación debido a su alta carga orgánica y microbiológica. Con el fin de desarrollar alternativas sostenibles para su manejo, se evaluó la valorización de estos residuos mediante fermentación anaerobia utilizando *Lactobacillus plantarum*. La metodología incluyó el acondicionamiento térmico del lodo a 120 °C durante una hora para reducir patógenos y mejorar su disponibilidad como sustrato, seguido de la inoculación con tres concentraciones de *Lactobacillus plantarum* o *L. plantarum* (5 %, 10 % y 15 %), bajo condiciones controladas de temperatura y pH. Durante 48 horas se monitorearon variables como el crecimiento bacteriano, consumo de carbohidratos, producción de biomasa y reducción de materia orgánica. El tratamiento con 5 % de inóculo presentó el mejor rendimiento, alcanzando 0.344 g de biomasa/g de carbohidrato consumido, con un coeficiente de conversión de 0.343 y un ajuste al modelo logístico con $R^2 = 0.964$, lo que refleja una cinética de crecimiento estable y eficiente. Asimismo, se logró una reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) del 56.8 %, junto con la inactivación completa de patógenos como huevos de helminto o coliformes fecales. Adicionalmente, el proceso favoreció la solubilización de nutrientes, especialmente carbohidratos fermentables, y permitió la obtención de una biomasa con hasta 32.5 % de proteínas, lo que refuerza su potencial como suplemento proteico en la alimentación animal. En conjunto, esta estrategia representa una alternativa biotecnológica viable para transformar residuos avícolas en productos de valor agregado, alineándose con principios de sustentabilidad y economía circular.

Palabras clave: Lodos residuales avícolas, *Lactobacillus Plantarum*, Fermentación anaerobia, Biomasa

Valorization of poultry slaughterhouse sludge through anaerobic processes with *L. plantarum* for the production of biomass with potential use in animal feed

Abstract: This study addresses the environmental and productive challenges posed by the generation of residual sludge from the poultry industry, which represents a significant source of pollution due to its high organic and microbiological load. In order to develop sustainable alternatives for its management, the valorization of poultry waste sludge was evaluated through anaerobic fermentation using *Lactobacillus plantarum*. The methodology involved thermal conditioning of the sludge at 120 °C for one hour to reduce pathogens and enhance substrate availability, followed by inoculation with three concentrations of *Lactobacillus plantarum* or *L. plantarum* (5 %, 10 %, and 15 %) under controlled temperature and pH conditions. For 48 hours, bacterial growth, carbohydrate consumption, biomass production, and organic matter reduction were monitored. The treatment with 5 % inoculum showed the highest yield, reaching 0.344 g of biomass per g of carbohydrate consumed, with a biomass-to-substrate conversion coefficient of 0.343 and a logistic model fit of $R^2 = 0.964$, indicating stable and efficient microbial growth kinetics. Furthermore, a 56.8 % reduction in chemical oxygen demand (COD) was achieved, along with the complete inactivation of pathogens such as helminth egg and fecal coliform. Additionally, the process favored the solubilization of nutrients, particularly fermentable carbohydrates, and led to the production of biomass containing up to 32.5 % protein, reinforcing its potential use as a protein-rich supplement in animal feed. Altogether, this biotechnological approach offers a viable alternative for transforming poultry waste into value-added products, contributing to sustainability and aligning with circular economy principles.

Keywords: Poultry residual sludge, *Lactobacillus plantarum*, Anaerobic fermentation, Biomass

Introducción

La producción avícola global ha experimentado un crecimiento sostenido en las últimas décadas, generando grandes volúmenes de residuos orgánicos (lodos, purines y efluentes) que representan un riesgo ambiental al contaminar suelos, cuerpos de agua y emitir gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O). En México, esta situación se ha agravado:

residuos agroindustriales, incluidas las descargas derivadas de la industria avícola, contribuyen de manera significativa al deterioro de la calidad del agua y los ecosistemas locales (Sales-Pérez *et al.*, 2025).

La industria avícola es un pilar económico que genera miles de empleos y abastece una parte sustancial de la demanda de proteína animal. Sin embargo, su manejo inadecuado de residuos ha ocasionado descargas con concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) y nutrientes que superan ampliamente los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2021). Esto ha derivado en problemas como eutrofización, disminución de oxígeno disuelto y proliferación de algas nocivas, afectando la biodiversidad y la salud pública.

En respuesta a esta problemática, *Lactobacillus plantarum* ha sido ampliamente estudiado como agente de fermentación anaerobia, al producir ácido láctico y enriquecer la biomasa con proteína y compuestos bioactivos. Investigaciones recientes han evidenciado que cepas de *L. plantarum* (*Lactobacillus plantarum*) aplicadas a subproductos avícolas mejoran la digestibilidad, reducen patógenos y optimizan la salud intestinal de pollos de engorde (Yang *et al.*, 2024; Loo *et al.*, 2025).

El presente estudio evalúa un proceso de biotransformación anaerobia aplicado a lodo avícola residual mediante el uso de *L. plantarum*, con el objetivo de reducir la DQO, eliminar microorganismos patógenos, liberar carbohidratos fermentables y producir biomasa con potencial uso en alimentación animal. Se utilizaron tres concentraciones de inóculo (5 %, 10 % y 15 %) y se analizaron variables fisicoquímicas y microbiológicas, así como el crecimiento celular y el consumo de carbohidratos, ajustados mediante un modelo logístico. Este enfoque propone una alternativa sustentable para el aprovechamiento de residuos avícolas dentro del marco de la economía circular agroindustrial.

Materiales y Métodos

Recolección y caracterización de la muestra

El lodo residual avícola fue proporcionado por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de una planta procesadora de aves de la región de las Altas Montañas. Esta instalación genera una cantidad significativa de lodos residuales como subproducto de sus procesos de sacrificio y eviscerado, los cuales contienen una alta carga orgánica y microbiológica. La recolección se realizó siguiendo protocolos estandarizados para garantizar la representatividad de la muestra, asegurando que proviniera de un punto de descarga con un flujo constante y características homogéneas. Posteriormente, el lodo fue transportado bajo condiciones controladas para evitar su degradación antes de ser sometido a los tratamientos biológicos propuestos en esta investigación.

Para su caracterización fisicoquímica, se determinaron los siguientes parámetros: pH mediante método potenciométrico; sólidos totales, volátiles y fijos mediante métodos gravimétricos; demanda química de oxígeno mediante método colorimétrico; proteínas y carbohidratos mediante métodos específicos (Sulfúrico-Antrona); y nitrógeno total mediante el método Kjeldahl. Todas las determinaciones se realizaron con base en normas oficiales mexicanas o metodologías estándar (APHA 2017; SEMARNAT 2002a; SEMARNAT 2002b; SEMARNAT 2022; SALUD 1995, SALUD 2015).

La caracterización microbiológica del lodo residual es un paso crucial para conocer su composición en cuanto a bacterias, hongos y otros microorganismos. Se evaluó la presencia de patógenos como huevos de helminto y coliformes totales, así como la carga de bacterias anaerobias, aerobias, ácido lácticas, y hongos y levaduras, mediante métodos de cultivo selectivo y uso de placas Petrifilm. Esta caracterización permite estimar el riesgo sanitario y el potencial biotecnológico del lodo.

Acondicionamiento de la muestra (tratamiento térmico)

Se aplicó un tratamiento térmico a 120 °C durante una hora para el acondicionamiento de una muestra representativa, con el objetivo de reducir la carga microbiana y cumplir con los lineamientos establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002a), que regula el uso y disposición de biosólidos para proteger la salud pública y el ambiente, así como modificar la estructura del lodo para mejorar su disponibilidad para los procesos biológicos posteriores. Una vez

tratado, el lodo fue nuevamente caracterizado fisicoquímica y microbiológicamente con los parámetros antes mencionados, con el fin de evaluar el impacto del tratamiento térmico sobre sus propiedades iniciales.

Propagación de microorganismos anaerobios

La propagación de microorganismos anaerobios fue realizada en condiciones controladas. *L. plantarum* fue cultivado en medio Man, Rogosa & Sharpe (MRS) líquido, a 37 °C y 120 rpm, bajo condiciones anaerobias. El cultivo se realizó en tubos de ensayo, y estas bacterias fueron utilizadas posteriormente para la fermentación del lodo.

Proceso de fermentación anaerobia

La biotransformación del lodo se llevó a cabo mediante un proceso biológico complementario: La fermentación anaerobia se realizó utilizando *L. plantarum* en medio MRS, bajo condiciones anaerobias, a 37 °C y con agitación constante de 120 rpm. Este proceso permite mejorar la digestibilidad del lodo y aumentar su contenido en metabolitos valiosos como proteínas y ácido láctico.

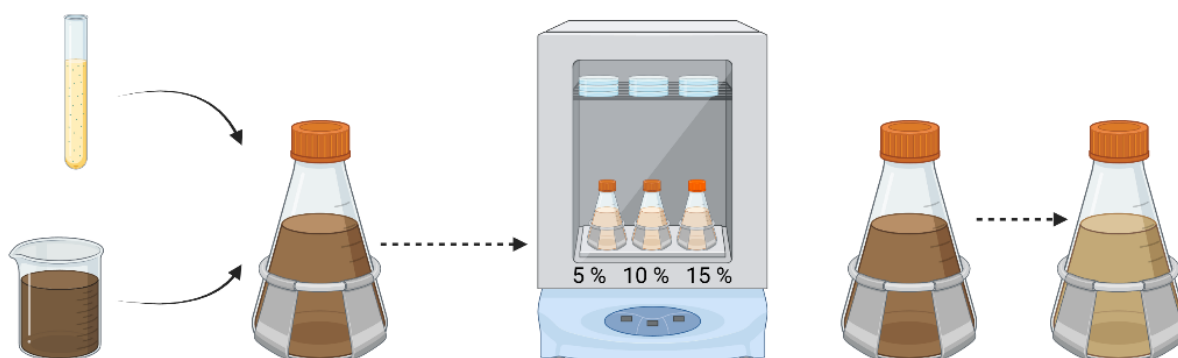


Figura 1. Proceso de biotransformación del lodo residuo avícola mediante *L. plantarum*

Cinética de biotransformación del lodo avícola mediante *Lactobacillus plantarum*

Para evaluar la eficiencia del proceso de fermentación anaerobia, se realizaron ensayos cinéticos en matraces Erlenmeyer de 250 mL, utilizando lodo tratado térmicamente como sustrato. A cada matraz se le agregó una concentración distinta de inóculo de *L. plantarum* (5 %, 10 % y 15 % v/v), generando tres tratamientos experimentales. Los matraces se incubaron a 37 °C, en condiciones anaerobias y con agitación constante de 120 rpm durante 48 horas. Cada cuatro horas se recolectaron muestras, a las que se les realizó determinación de carbohidratos totales, pH, conteo celular de *Lactobacillus plantarum*.

Evaluación del rendimiento de biomasa y análisis comparativo de la fermentación anaerobia

Para la evaluación del rendimiento del proceso de fermentación anaerobia, se establecieron criterios comparables centrados en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Se monitoreó, el consumo de carbohidratos, pH y crecimiento celular, así como la biomasa generada.

El proceso de fermentación anaerobia con *Lactobacillus plantarum*, realizado a diferentes concentraciones de inóculo mencionadas anteriormente, se realiza con el fin para evaluar su influencia sobre la velocidad de transformación del lodo tratado térmicamente, bajo condiciones estrictamente anaerobias. Durante el proceso, se realizaron dos réplicas del proceso con muestreos periódicos cada 4 horas a lo largo de 48 horas para registrar las variaciones de los parámetros establecidos.

Finalmente, los datos obtenidos en el proceso fueron sistematizados para su análisis comparativo. El análisis cinético se planteó utilizando el modelo logístico para el caso de la fermentación anaerobia con el fin describir el comportamiento del crecimiento microbiano en condiciones controladas.

Resultados y Discusión

Se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos tanto al lodo tratado como al lodo sin tratamiento para comparar sus características y evaluar el impacto del tratamiento térmico. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica para el lodo residual avícola

Concentración (%v/v)	No tratado	Tratado térmicamente
pH	7.49 ± 0.01	6.64 ± 0.01
Nitrogeno (%)	0.40 ± 0.053	0.20 ± 0.042
Proteínas (%)	2.5 ± 0.15	1.25 ± 0.10
Carbohidratos (g/L)	17.09 ± 0.03	19.098 ± 0.034
Sólidos totales (%)	0.989 ± 0.07	3.405 ± 0.09
Sólidos volátiles (%)	0.486 ± 0.04	2.782 ± 0.06
Sólidos fijos (%)	0.503 ± 0.032	0.623 ± 0.065
Bacterias aerobias (UFC/mL)	7.41 × 10 ⁶	6.54
Hongos y levaduras (UFC/mL)	3.25 × 10 ⁵	1.375
DQO total (mg/L)	25,000 ± 2,000	20,000 ± 1,500
DQO soluble (mg/L)	3,500 ± 500	7,000 ± 800
Fósforo total (mg/L)	80 ± 5	95 ± 6
Huevos de helmintos	No detectados	No detectados

Reducción de patógenos

El tratamiento térmico a 120 °C por una hora resultó eficaz para reducir la carga microbiana, eliminando completamente los coliformes fecales y huevos de helmintos. También se observó una notable disminución en bacterias aerobias y hongos/levaduras. Estos resultados concuerdan con estudios previos, como los de Pratap *et al.*, (2024), que señalan la efectividad de temperaturas superiores a 70 °C durante una hora para eliminar patógenos como *Ascaris spp.*, y Coe *et al.* (2022), quienes reportaron la inactivación de *Salmonella*. a 75, 85 y 95 °C en 3 minutos. Siendo estos parámetros muy comunes para la eliminación de organismos patógenos (Estrada-García *et al.*, 2023). El tratamiento térmico también causó un descenso en el pH (de 7.49 a 6.64) y un incremento en sólidos totales, volátiles y fijos, lo que favorece procesos como la fermentación anaerobia, al aumentar la biodisponibilidad de compuestos fermentables y reducir microorganismos indeseados. Esto coincide con lo reportado por Bulkowska y Zielinska (2024), que a temperaturas (60 a 120 °C), típicamente asociadas con la hidrólisis térmica, la energía térmica induce principalmente la solubilización de los componentes, particularmente proteínas y polisacáridos de alto peso molecular. Durante esta fase, se exponen grupos funcionales hidrofílicos, como grupos hidroxilo y amino, lo que incrementa la repulsión electrostática entre las partículas del lodo. Esto da lugar a la formación de una red similar a un gel que retiene agua dentro de la matriz del lodo, provocando una mayor viscosidad y una menor capacidad de deshidratación

Solubilización de materia orgánica y nutrientes

Se evidenció un aumento en sólidos solubles y carbohidratos, lo que indica una hidrolización parcial de la materia orgánica. Esto concuerda con estudios que demuestran que tratamientos térmicos entre 125 y 175 °C mejoran la solubilización de compuestos orgánicos y aumentan la biodegradabilidad del lodo en la digestión anaerobia (Pratap *et al.*, 2024). Sin embargo, se observó una disminución en el contenido de nitrógeno, posiblemente asociada a procesos previos de nitrificación y desnitrificación.

Con el objetivo de contextualizar y respaldar los resultados obtenidos tras el tratamiento térmico del lodo residual avícola, se llevó a cabo un análisis comparativo con investigaciones recientes que emplearon metodologías similares en el tratamiento de residuos agroindustriales mediante hidrólisis térmica o procesos fermentativos. La Tabla 2 presenta la comparación de los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en este estudio con los reportados por Méndez-Contreras *et al.* (2024) y Flores-Asis *et al.* (2019).

Bulkowska y Zielinska (2024), mencionan que emplearon un proceso de desintegración térmica con lodo residual activado. Esta comparación permite evidenciar similitudes y diferencias en el comportamiento del sustrato bajo condiciones térmicas y biológicas, así como valorar el desempeño del proceso desarrollado en esta investigación en relación con experiencias previas documentadas en la literatura científica (Hoque y Debi, 2025).

Tabla 2. Análisis comparativo de resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica en el empleo del pretratamiento térmico (comparativa con otros autores)

Parámetro	Lodo avícola tratado térmicamente (presente estudio)	Lodo avícola tratado y suplemento con micronutrientes (Méndez-Contreras <i>et al.</i> , 2024)	Lodo avícola tratado para la producción de biogás (Flores-Asis <i>et al.</i> , 2019)
pH	6.64	6.35	6.89
Nitrógeno (%)	0.20	5.11	6.5
Proteínas (%)	1.25	-	18.23
Carbohidratos g/L	19.10	-	0.57
Sólidos Totales (%)	3.41	3.18	1.56
Sólidos Volátiles (%)	2.78	73.10	70.83
Sólidos Fijos (%)	0.62	-	-
Bacterias aerobias (UFC/ml)	6.54	-	-
Hongos y levaduras (UFC/ml)	1.38	-	-
DQO Total (mg/L)	20,000	-	1,759.4
DQO Soluble (mg/L)	7,000	14,282	
Fósforo Total (mg/L)	95	2.35	25 Ppm
Huevos de helmintos	No detectados	< 3	-
Coliformes fecales (UFC/ml)	0	< 3	-

El lodo residual avícola tratado térmicamente en este estudio presentó un pH de 6.64, diferente con los valores reportados por Bulkowska y Zielinska (2024) de un pH de 10, lo que indica un entorno adecuado para la fermentación anaerobia. El contenido de nitrógeno total (0.20 %) y proteínas (1.25 %) fue inferior al observado en ambos estudios comparativos, posiblemente debido al sistema de tratamiento primario (DAF) que favorece la eliminación de compuestos nitrogenados, lo cual podría limitar su uso sin suplementación externa.

El contenido de carbohidratos (19.1 g/L) fue mayor al de los estudios revisados, lo que garantiza una fuente fermentable favorable para el crecimiento de *L. plantarum*. La concentración de sólidos totales (3.41 %) indica una adecuada densidad de materia orgánica, mientras que los sólidos volátiles y fijos se mantuvieron dentro de rangos esperados (Flores-Asis *et al.*, 2019). Esto facilita el mezclado y homogenización del sistema, lo cual favorece el intercambio de masa (Estrada-García *et al.*, 2023). La carga microbiana se redujo drásticamente tras el tratamiento térmico, permitiendo condiciones óptimas para la inoculación selectiva.

La DQO total fue de 20,000 mg/L, con una fracción soluble de 7,000 mg/L, lo cual refleja una buena disponibilidad de sustrato degradable. El fósforo total (95 mg/L) se mantuvo dentro del rango óptimo para procesos biotecnológicos. Finalmente, la eliminación total de coliformes fecales demuestra la efectividad del tratamiento térmico y el cumplimiento con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002a), posicionando a este lodo como un biosólido seguro y potencialmente reutilizable (Méndez-Contreras *et al.*, 2024).

Mejora en la fermentabilidad y uso en bioprocesos

Los niveles elevados de carbohidratos en ambas muestras sugieren un ambiente favorable para el crecimiento de *L. plantarum*. Sin embargo, el tratamiento térmico aumentó la biodisponibilidad de azúcares, lo que podría mejorar la producción de ácido láctico durante la fermentación anaerobia.

Cinéticas de biotransformación del lodo residual con *L. plantarum*

Se evaluó la biotransformación anaerobia del lodo usando *L. plantarum* a concentraciones de inóculo del 5%, 10% y 15%. Las fermentaciones se realizaron en matraces Erlenmeyer de 250 mL con 200 mL de volumen total. Se incubaron a 37 °C con agitación de 120 rpm durante 48 horas. Cada 4 horas se tomaron muestras de 2 mL para medir concentración de carbohidratos, crecimiento celular (UFC/mL en agar MRS) y pH. El modelo matemático utilizado para estas cinéticas es el Modelo Logístico como se presenta en la Ecuación 1.

$$Y = \frac{a}{1 + \exp[-k_s(x - T_i)]} \quad (1)$$

Donde: Y representa la variable respuesta, que puede ser: La concentración remanente de carbohidratos (g/L) en función del tiempo, o el crecimiento celular expresado como log UFC/mL; x es el tiempo transcurrido en horas desde el inicio de la fermentación; a corresponde al valor máximo alcanzado por la variable; Y: Para carbohidratos, representa la concentración inicial total, para biomasa microbiana, la biomasa máxima observada al final del periodo; k_s es la tasa máxima específica, que indica la velocidad del proceso, ya sea de consumo o crecimiento; T_i es el tiempo de inflexión o latencia, correspondiente al período inicial en que no se observa un cambio significativo en la variable, representando la adaptación metabólica o celular al ambiente del lodo.

Aplicación para el consumo de carbohidratos

Durante las primeras horas, los carbohidratos presentes en el lodo residual permanecen relativamente estables debido a la fase de adaptación de las bacterias. A partir del tiempo T_i , *L. plantarum* comienza a metabolizar activamente los carbohidratos, lo que se traduce en una disminución acelerada en su concentración, reflejada en la curva logística descendente (cuando se grafican los carbohidratos consumidos, se puede usar la transformación $a - Y$, para visualizar la disminución).

Aplicación para el crecimiento celular

El crecimiento microbiano sigue una dinámica típica, donde tras un tiempo de latencia T_i , las células entran en fase exponencial con una tasa máxima k_s , hasta alcanzar una biomasa máxima a, donde el crecimiento se estabiliza por limitaciones de sustrato o acumulación de productos metabólicos.

Parámetros comparativos

La comparación entre los diferentes porcentajes de inóculo (5%, 10%, 15%) permite evaluar cómo varían los parámetros k_s y T_i , proporcionando información sobre: La rapidez con que *L. plantarum* adapta y consume carbohidratos en el lodo. La velocidad y magnitud del crecimiento celular en función de la concentración inicial de bacterias inoculadas.

En el inóculo del 5 % se observó un crecimiento sostenido hasta 36 h alcanzando ~11.0 Log UFC/mL. El consumo de carbohidratos fue completo hacia el final del experimento, mostrando eficiencia en la conversión de sustrato como se observa en la Figura 3.

En el inóculo del 10% se observó un crecimiento más acelerado, alcanzando ~11.6 Log UFC/mL en 24–32 h, y consumo completo de carbohidratos hacia las 60 h. Se logró una bioconversión más rápida como se aprecia en la Figura 4.

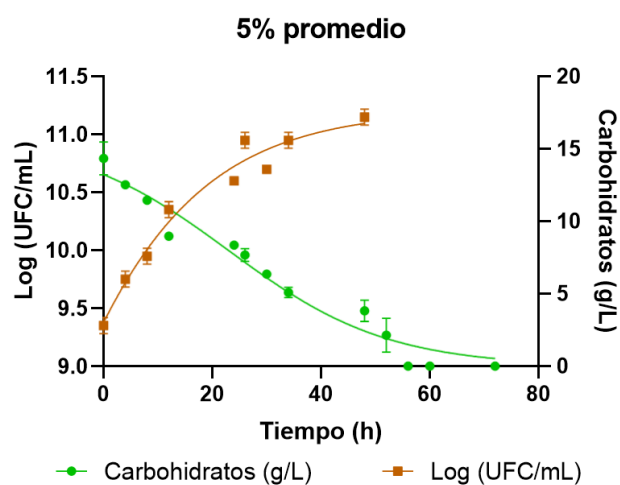


Figura 3. Crecimiento celular con inóculo del 5 % *L. plantarum*

En el inoculo del 15 % se observó mayor velocidad de crecimiento inicial (~11.8 Log UFC/mL en 24 h), pero con una caída abrupta después de 40 h. Esto sugiere inhibición por acumulación de metabolitos o agotamiento de nutrientes como se observa en la Figura 5.

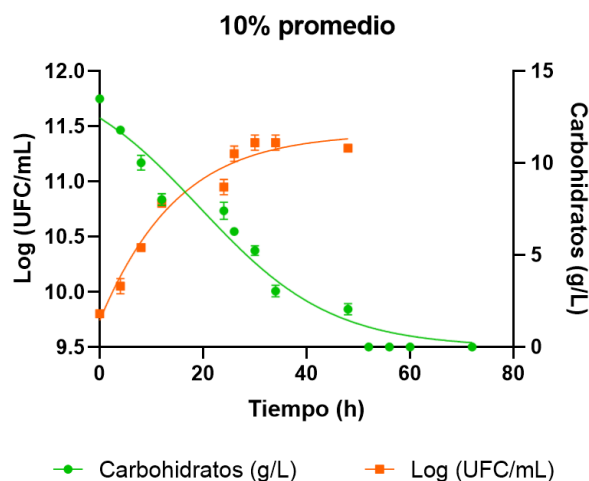


Figura 4. Crecimiento celular con inóculo del 10 % *L. Plantarum*

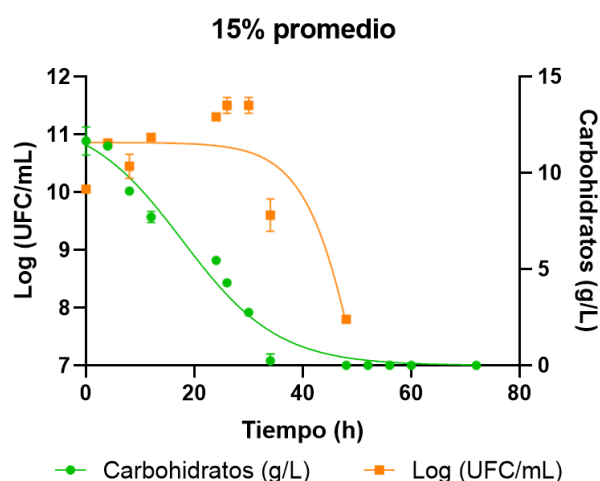


Figura 5. Crecimiento celular con inóculo del 15 % *L. Plantarum*

Tabla 3. Resultados del rendimiento de biomasa producida con *L. Plantarum*

Concentración (%v/v)	Rendimiento g biomasa/g carbohidratos	Tiempo de evaluación (horas)
5	0.344	48
10	0.181	48
15	0.239	30

Tabla 4. Parámetros cinéticos obtenidos con el modelo Logístico de tres parámetros del proceso de biotransformación con *L. Plantarum*

Concentración (%v/v)	K_s (h^{-1})	μ_{max} (h^{-1})	λ (h)	a [Log UFC/ml]	$Y_{B/S}$ [LogUFC. g^{-1}]	R^2
5	0.061	0.1702	-59.79	11.21	0.343	0.964
10	0.077	0.220	-48.62	11.43	0.341	0.965
15	-0.182	-0.494	63.95	10.86	0.375	0.582

Comparativa con estudios recientes sobre fermentación anaerobia con *Lactobacillus plantarum*

Con el propósito de contextualizar y validar los resultados obtenidos en este estudio, se compararon parámetros de rendimiento de biomasa y cinética microbiana con tres investigaciones recientes que aplicaron fermentación anaerobia usando *Lactobacillus plantarum* sobre residuos agroindustriales que se observan en la Tabla 4. Haokok *et al.* (2023) aplicaron *L. plantarum* TSKKU P-8 junto a *Levilactobacillus brevis* en bagazo de caña prehidrolizado mediante enzimas, utilizando un proceso combinado de hidrólisis y co-fermentación (SScF). Reportaron una alta producción de ácido láctico y modelaron la cinética con un buen ajuste logístico

Derabli *et al.* (2022) estudiaron la fermentación de residuos de *Opuntia ficus-indica* (cactus) con *L. plantarum*, tras digestión ácida, alcanzando un rendimiento notable de biomasa e influyendo positivamente en la nutrición microbiana, también respaldado por un sólido ajuste al modelo logístico. Akermann *et al.* (2021) cultivaron *L. delbrueckii* Subsp.

lactis en granos gastados de cerveza, modelando su crecimiento con un modelo logístico, obteniendo $\mu_{max} \approx 0.43 h^{-1}$, y un ajuste ($R^2 \approx 0.99$).

Tabla 5. Análisis comparativo de parámetros cinéticos y rendimiento microbiano

Estudio	Sustrato	Inóculo (%)	Rendimiento (g biomasa/g carbohidrato)	μ_{max}	λ (h)	R^2
Presente estudio	Lodo avícola* (térmico)	5	0.344	0.1702	-59.8	0.964
Akermann <i>et al.</i> (2021)	Granos gastados de cerveza	-	0.31	0.43-0.46	≈ 25.4	0.99
Derabli <i>et al.</i> (2022)	Residuos de <i>Opuntia</i>	-	0.12	0.18-0.36	-	0.98
Estrada-García <i>et al.</i> (2023)	Excretas porcinas	-	0.27	0.11-0.057	5.73-12.67	0.945

El rendimiento obtenido con 5 % inóculo (0.344 g biomasa/g carbohidrato) es superior a los valores reportados en estudios previos (0.27–0.31), demostrando alta eficiencia. Por otro lado, la tasa μ_{max} (0.170 h⁻¹) es menor que las de comparación, lo cual puede deberse a la complejidad del sustrato (lodo residual con componentes resistentes). Sin embargo, la R^2 (0.964) indica un ajuste fuerte al modelo logístico. Las fases de latencia (λ) difieren debido a condiciones distintas de inoculación y sustratos, pero tu modelo fue robusto en tiempo y ajuste.

Conclusiones:

La presente investigación demostró el potencial del lodo residual avícola como sustrato para la generación de biomasa con aplicación en la industria de alimentación animal, mediante su biotransformación a través de procesos anaerobios con *L. plantarum*. La caracterización inicial del lodo evidenció una alta carga orgánica y microbiológica, lo cual representa un riesgo ambiental si no se gestiona adecuadamente, pero también una oportunidad para su valorización biotecnológica. El tratamiento térmico previo permitió reducir significativamente la carga patógena y mejorar la disponibilidad de nutrientes, favoreciendo el proceso de fermentación. *L. plantarum* mostró una alta capacidad de adaptación y crecimiento, especialmente a concentraciones de inóculo de 10 % y 15 %, logrando una transformación eficiente del lodo en biomasa rica en proteínas y compuestos bioactivos. El análisis cinético, modelado mediante la ecuación logística, confirmó el comportamiento favorable del crecimiento microbiano bajo estas condiciones.

El aprovechamiento de lodos residuales de plantas procesadoras de aves mediante procesos anaerobios representa una estrategia viable para la generación de biomasa con potencial uso en la industria alimentaria animal. Los resultados obtenidos sugieren que este proceso es eficiente tanto en términos de producción de biomasa como en la reducción de contaminantes. Esta investigación contribuye al desarrollo de estrategias sustentables en el sector avícola, promoviendo un enfoque de economía circular mediante la valorización de residuos orgánicos, la mitigación del impacto ambiental y la obtención de productos funcionales a partir de desechos agroindustriales.

Agradecimientos y financiamiento:

Sánchez-Solano agradece el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada con CVU: 1340477, de la misma manera se agradece el financiamiento de la presente investigación al Tecnológico Nacional de México a través del proyecto TecNM 20264.24-P, los cuales hicieron posible la realización de este trabajo.

Bibliografía

- Akermann, A., Weiermüller, J., Lenz, S., Christmann, J., & Ulber, R. (2021). Kinetic model for simultaneous saccharification and fermentation of brewers' spent grain liquor using *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *lactis*. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 26, 114–124. <https://doi.org/10.1007/s12257-020-0153-z>
- APHA. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Bulkowska, K., & Zielińska, M. (2024). Thermal disintegration of waste-activated sludge. *Energies*, 17(17), 4447. <https://doi.org/10.3390/en17174447>

- Coe, C., Boltz, T., Stearns, R., Foster, P., Taylor, J. R. L., Moritz, J., Jaczynski, J., Freshour, A., & Shen, C. (2022). Thermal inactivation of *Salmonella* Typhimurium and surrogate *Enterococcus faecium* in mash broiler feed in a laboratory scale circulated thermal bath. *Poultry Science*, 101(8), 101234. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101976>
- Derabli, B., Nancib, A., Nancib, N., Aníbal, J., Raposo, S., Rodrigues, B., & Boudrant, J. (2022). *Opuntia ficus-indica* waste as a cost-effective carbon source for lactic acid production by *Lactobacillus plantarum*. *Food Chemistry*, 370(1), 131005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131005>
- Estrada-García, J., Hernández-Aguilar, E., Romero-Mota, D. I., & Méndez-Contreras, J. M. (2023). Influence of anaerobic biotransformation process of agro-industrial waste with *Lactobacillus acidophilus* on the rheological parameters: Case study of pig manure. *Archives of Microbiology*, 205, 99. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03437-8>
- Flores-Asís, R., Méndez-Contreras, J. M., Alvarado-Lassman, A., Fernández-Lambert, G., Villanueva-Vásquez, D., & Aguilar-Lasserre, A. A. (2019). Analysis of the behavior for operation parameters in the anaerobic digestion process with thermal pretreatment, using fuzzy logic. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54(6), 592–602. <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1593010>
- Hoque, M., & Devi, K. T. R. (2025). Agro-industrial waste management: Solid-state fermentation for biomass conversion and valorisation to value-added products. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 5, 990–999. <https://doi.org/10.1007/s43393-025-00371-2>
- Loo, J. S., Oslan, S. N. H., Mokshin, N. A. S., Othman, R., Amin, Z., Dejtsakdi, W., Prihanto, A. A., & Tan, J. S. (2025). Comprehensive review of strategies for lactic acid bacteria production and metabolite enhancement in probiotic cultures: Multifunctional applications in functional foods. *Fermentation*, 11(5), 241. <https://doi.org/10.3390/fermentation11050241>
- Méndez-Contreras, J. M., Atenodoro-Alonso, J., López-Escobar, L. A., & Nava-Valente, N. (2024). Enhanced biogas production from thermophilic anaerobic digestion of poultry slaughterhouse sludge: Effect of thermal pretreatment and micronutrients supplementation. *Waste and Biomass Valorization*, 15, 2201–2214. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02277-3>
- Pratap, V., Kumar, S., & Ram Yadav, B. (2024). Sewage sludge management and enhanced energy recovery using anaerobic digestion: An insight. *Water Science and Technology*, 90(3), 696–720. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.269>
- Sales-Pérez, R. E., Estrada-García, J., Hernández-Martínez, J. M., Pérez-Guzmán, S. M., & Méndez-Contreras, J. M. (2025). Kinetics of biological treatment of poultry slaughterhouse wastewater in photobioreactors operated with *Nannochloropsis oculata*: A strategy for the valorization of agro-industrial effluents. *Waste and Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03415-9>
- SALUD. (1995). NOM-112-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes totales en placa por el método del número más probable (NMP). Diario Oficial de la Federación, 18 de agosto de 1995.
- SALUD. (2015). NOM-210-SSA1-2014. Productos y servicios. Métodos para la detección de *Salmonella* spp. en productos alimenticios. Diario Oficial de la Federación, 26 de enero de 2015.
- SEMARNAT. (2002a). NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental—Lodos y biosólidos—Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación, 15 de agosto de 2003.
- SEMARNAT. (2002b). NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 2002.
- SEMARNAT. (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación, 11 de marzo de 2022.
- Yang, C., Wang, S., Li, Q., Zhang, R., Xu, Y., & Feng, J. (2024). Effects of probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* HJLP 1 on growth performance, antioxidant activity and cecal microflora in broiler chickens. *Animals*, 14(5), 668. <https://doi.org/10.3390/ani14050668>