

REVISTA MEXICANA DE

ISSN: 3122-4369

REVISTA PERIÓDICA

INGENIERÍA APLICADA

DIGITAL

Ciencia, tecnología e innovación
para un México más competitivo
y sostenible



VOLUMEN

1



NÚMERO

2



MAYO

2026



ISSN

3122-4369

REVISTA PERIÓDICA



INGENIERÍA
INTELIGENTE

Soluciones innovadoras
para desafíos reales



TECNOLOGÍA Y
DESARROLLO

Impulsando el progreso
de la industria y la sociedad



SOSTENIBILIDAD Y
MEDIO AMBIENTE

Comprometidos con
un futuro sustentable



IMPACTO SOCIAL
Ingeniería al servicio
de México



VISITANOS EN:

 <https://www.revistamexicana.org>



contacto@revistamexicana.org

REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA APLICADA, año 1, núm. 2, mayo-agosto de 2026, es una publicación cuatrimestral editada por Osbaldo Hernández Guevara, Colón poniente No. 127 altos 3, colonia centro C.P. 94300, Orizaba, Veracruz. Teléfono (272)1055229.

Página electrónica de la revista:

www.revistamexicana.org

Correo electrónico: admin@revistamexicana.org

Editor responsable: **Profesor Osbaldo Hernández Guevara**. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo **No. 04-2026-032410524900-102**, ISSN: **3122-4369** — ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número: **Profesor Osbaldo Hernández Guevara**, Colón poniente No. 127 altos 3, colonia centro C.P. 94300, Orizaba, Veracruz.

Fecha de última modificación: **20 de abril de 2026**. Tamaño del archivo: **3296 KB**.

Editor titular

Dr. Osbaldo Hernández Guevara

COMITÉ DE ARBITRAJE

Dr. Noé Aguilar Rivera	Universidad Veracruzana
M.C. Jorge Armida Lozano	Instituto Tecnológico Superior de Zongolica
Dr. Julio Diaz José	Univerasidad Veracruzana
M.C. Mari Trini Flores Castañeda	Instituto Tecnológico de Orizaba
Dr. Osbaldo Hernández Guevara	Universidad Veracruzana
M.D.A. Greg Jiménez Nestoso	Universidad Veracruzana
Dr. Jaime Jiménez Guzman	Universidad Veracruzana
Dr. Daniel Alejandro Lara Rodriguez	Universidad Veracruzana
M.C. Alejandro Llaguno Aguiñaga	Instituto Tecnológico Superior de Zongolica
Dr. Oziel Dante Montañez Valdez	Universidad de Guadalajara
Dr. Luis Moises Morales Crispín	Universidad Veracruzana
M.H.T. Isalia Morales Palacios	Universidad Politécnica de Huatusco
M.A. Elizabeth Pacheco Reyes	Universidad Politécnica de Huatusco
M. C. Nuria Estefania Prado Mora	Instituto Tecnológico de Orizaba
Dr. Rubén Purroy Vásquez	Instituto Tecnológico Superior de Zongolica
Dr. José Orlando Ramírez Valencia	Universidad Veracruzana
M.C. Mauricio Rojas Ascención	Instituto Tecnológico Superior de Zongolica
Dra. Mayra Vazquez Luna	Colegio de la Frontera Sur Unidad Chetumal
Dra. Dinora Vazquez Luna	Universidad Veracruzana
Dra. Mayra Viviana Velazquez Macario	Universidad Veracruzana
Dra. Guadalupe Vivar Vera	Universidad Veracruzana
Dr. Pedro Zetina Córdoba	Universidad Politécnica de Huatusco

Áreas: Ingeniería en Alimentos e Ingeniería en agronomía

Índice

Economía circular en la industria láctea: desarrollo de biopelículas a partir de suero de kéfir	1
Efecto del oleogel con borra de café en chocolate semiamargo: textura y análisis sensorial.....	9
Dimensiones de la transición agroecológica: una aproximación en el trópico veracruzano.....	16
Zeolitas naturales como acarreadores de antioxidantes para la mitigación del estrés oxidativo en cultivos agrícolas	23
Evaluación de prácticas agrícolas del <i>chayote (sechium edule(jacq.) sw.)</i> en las altas montañas de Veracruz.....	30
Aclimatación de orquídeas del género <i>Dendrobium nobile “spring dream”</i> con Glicina y Cisteína como biestimulantes.....	35
Cinéticas de extracción acuosas de antocianinas a partir de <i>Clitoria ternatea</i>	42
Nivel de aceptación de tortilla alto-proteica elaborada a partir de maíz nativo.....	51
Evaluación del crecimiento del forraje verde hidropónico con diferentes concentraciones de fertilizante hidropónico	61
El ganado criollo un reservorio de genética funcional	69
Estrategia fitoterapéutica con <i>tithonia diversifolia</i> y <i>canavalia ensiformis</i> para el control endoparasitario en ovinos de pelo.....	76
Canales prácticos para la ganadería integral: biodiversidad funcional e integración de sistemas multiestratos.....	87
Sistemas forrajeros mixtos para la producción ovina tropical: impacto productivo y sostenibilidad agroecológica.....	96
Suplemento fermentado aeróbico en bovinos doble propósito: desempeño productivo en Veracruz	104
Análisis térmico e hidráulico de un intercambiador de calor de tubos y coraza con bafles helicoidales en simulación numérica cfd de jugo de fruta.....	112
Bebida Fermentada De Tuna (<i>Opuntia Ficus-Indica</i>) Por Bacterias Aisladas Del Jengibre (<i>Zingiber Officinale</i>).....	118
Elaboración de un snack adicionado con harina de camarón liofilizada y fibra de garbanzo.....	125



Economía circular en la industria láctea: desarrollo de biopelículas a partir de suero de kéfir

Veneroso-Santos, Elizabeth¹, Saucedo-Rivalcoba, Veronica^{1*}, Hernández-Ramírez, Gabriela¹, Gutiérrez-Rivera Beatriz¹ y Vázquez-Larios Ana Line¹

¹Biotecnología enzimática y de fermentaciones/Maestría en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología.
Tecnológico Nacional de México/Campus Tierra Blanca

* veronica.saucedo@itstb.edu.mx

Artículo científico

Resumen

Se desarrollaron biopelículas biodegradables a partir del suero de kéfir y del alginato de sodio como alternativa sostenible para el empaque de alimentos. El suero, obtenido mediante fermentación de leche semidescremada, presentó pH de 4.06 ± 0.05 , 6.47 ± 0.15 °Brix, acidez de 1.24 ± 0.01 , humedad de 96.20 ± 0.36 % y sólidos totales de 4.80 ± 0.38 %, además de la ausencia de patógenos. Las biopelículas se elaboraron mediante casting con alginato al 1 % (p/v) y suero al 10, 30 y 50 % (v/v), obteniéndose materiales homogéneos, flexibles y estructuralmente estables. Los resultados evidencian que el suero de kéfir es una matriz funcional viable en combinación con alginato para producir empaques biodegradables que favorecen la conservación de alimentos y reducen el impacto ambiental.

Introducción

En los últimos años, la industria alimentaria ha mostrado una creciente preocupación por el impacto ambiental de los materiales plásticos convencionales de un solo uso, debido a su limitada biodegradabilidad y a su acumulación en ecosistemas terrestres y acuáticos [1]. Esta problemática ha impulsado el desarrollo de alternativas sostenibles y biodegradables para el envasado de alimentos, orientadas a disminuir la contaminación ambiental y reducir la dependencia de polímeros derivados del petróleo [2]. Dentro de estas alternativas, las biopelículas y los recubrimientos han adquirido gran relevancia por su capacidad de actuar como barreras semipermeables frente a gases, humedad y compuestos volátiles, lo que contribuye a mantener la calidad y prolongar la vida útil de diversos productos alimenticios [3].

Las películas tipo *film* elaboradas a partir de biopolímeros naturales presentan ventajas importantes, como biodegradabilidad, biocompatibilidad, inocuidad y disponibilidad de materias primas renovables [4]. Entre los biopolímeros más utilizados destaca el alginato de sodio, un polisacárido extraído principalmente de algas pardas, reconocido por sus propiedades filmógenas, capacidad gelificante y para formar matrices estructurales con propiedades mecánicas y de barrera favorables [5]. Asimismo, el alginato posee alta afinidad por el agua y la capacidad de formar redes tridimensionales mediante reticulación iónica, características que favorecen su aplicación en sistemas de conservación de alimentos [6].

Por otro lado, el kéfir es una bebida fermentada obtenida mediante la acción simbiótica de bacterias ácido-lácticas y levaduras, que contiene diversos compuestos bioactivos, péptidos, polisacáridos y metabolitos con potencial antimicrobiano y antioxidante [7]. Durante la producción de kéfir se genera suero, considerado un subproducto rico en proteínas, minerales y microorganismos benéficos, que puede aprovecharse para el desarrollo de materiales funcionales con aplicaciones alimentarias [8]. Diversos estudios han reportado que la incorporación de proteínas y compuestos bioactivos provenientes de matrices fermentadas en biopelículas mejora propiedades como la elasticidad, la resistencia mecánica, la actividad antimicrobiana y la estabilidad estructural [9].

La combinación de polisacáridos y proteínas permite obtener materiales con mejores propiedades fisicoquímicas y funcionales que las películas elaboradas a partir de un solo biopolímero [10]. En este sentido, las mezclas de alginato con componentes proteicos han demostrado mejorar la cohesión intermolecular y reducir la permeabilidad al vapor de agua y al oxígeno, aspectos fundamentales para la conservación de alimentos perecederos como frutas y hortalizas [11]. Además, el desarrollo de empaques a partir de compuestos naturales representa una estrategia innovadora para incrementar la inocuidad alimentaria y disminuir las pérdidas postcosecha [12].

Las frutas tropicales presentan una elevada actividad metabólica y una alta susceptibilidad al deterioro microbiológico y fisiológico tras la cosecha, lo que ocasiona pérdidas significativas durante el almacenamiento y la comercialización [13]. Por ello, el uso de biopelículas con propiedades de barrera y potencial actividad antimicrobiana constituye una alternativa prometedora para prolongar su vida útil y preservar atributos de calidad como la textura, el color y el contenido nutricional [14].

Con base en lo anteriormente mencionado, el objetivo de este trabajo fue formular y sintetizar una biopelícula a partir de suero de kéfir y alginato de sodio, así como evaluar sus propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y morfológicas, a fin de determinar la compatibilidad de los biopolímeros y, posteriormente, realizar su caracterización mecánica, estructural y de barrera, para su aplicación como material de empaque para la conservación de frutas tropicales.

Metodología

1. Obtención y caracterización del suero de kéfir

El kéfir se elaboró mediante la inoculación de gránulos de kéfir a una concentración del 1% (p/v) y utilizando como sustrato leche semidescremada comercial [8]. El suero de kéfir fue caracterizado fisicoquímicamente mediante la determinación de pH (AOAC 981.12), acidez titulable (AOAC 947.05) y sólidos totales (AOAC 925.23), empleando metodologías oficiales de la AOAC International. Asimismo, se realizó la caracterización microbiológica del suero de kéfir con el fin de determinar la ausencia de microorganismos patógenos y evaluar la presencia de microbiota benéfica. Para ello, se efectuaron siembras en diferentes medios de cultivo selectivos y diferenciales para patógenos; agar cromogénico (Chromogenic Agar), agar MacConkey, agar eosina azul de metileno (EMB) y agar Salmonella-Shigella (SS). De igual manera, se realizaron siembras en agar papa dextrosa (PDA), agar nutritivo y agar Sabouraud, incubando las placas durante 48 h para observar el crecimiento de bacterias ácido-lácticas (BAL) y de levaduras características del kéfir.

2. Síntesis de biopelículas

Las biopelículas se elaboraron mediante el método *de casting*, utilizando soluciones de alginato de sodio al 1% (p/v) y disolviéndolas en suero de kéfir bajo agitación constante. Las soluciones se vertieron en moldes y se secaron a 35 °C durante 10 h. Posteriormente, se realizó el entrecruzamiento mediante inmersión en una solución de cloruro de calcio al 1 % (p/v). Las biopelículas obtenidas se evaluaron en términos de sus propiedades morfológicas para determinar el grado de compatibilidad o separación de fases de los biopolímeros.

Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica del suero de kéfir

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del suero de kéfir fermentado durante 48 h se presentan en la Tabla 1. Los valores obtenidos para pH, °Brix, acidez titulable, humedad y sólidos totales se encuentran dentro de los rangos reportados por diferentes autores para bebidas fermentadas del tipo kéfir, lo que indica una adecuada fermentación y estabilidad del sistema.

El descenso de pH se atribuye principalmente a la producción de ácidos orgánicos, especialmente ácido láctico, generado por la actividad metabólica de bacterias ácido-lácticas presentes en los gránulos de kéfir [8]. Un pH ácido favorece, además, la inhibición de microorganismos patógenos y contribuye a la estabilidad microbiológica del producto [16]. Así mismo, los °Brix están relacionados con la presencia de azúcares residuales, compuestos solubles y metabolitos generados durante la fermentación. La disminución parcial de azúcares fermentables durante el proceso puede explicar los valores obtenidos, debido al consumo de lactosa por bacterias y levaduras [18]. Por otro lado, la acidez constituye un indicador importante del grado de fermentación y de la actividad de bacterias ácido-lácticas, las cuales producen compuestos ácidos responsables del sabor característico y de la conservación natural del kéfir [19].

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de suero de kéfir a 48 h de fermentación.

Parámetro	Suero de kéfir	Otros autores
pH	4.06 ± 0.05	4.0 – 4.5 Leite <i>et al.</i> [15]
Humedad %	96.20 ± 0.36	~97 % Farnworth [16]
°Brix	6.47 ± 0.15	5.5 – 7.0 Garrote <i>et al.</i> [17]
Acidez titulable	1.24 ± 0.01	1.0 – 1.5 % Leite <i>et al.</i> [15]
Sólidos totales	4.80 ± 0.38	3.5 – 5.0 Schwan <i>et al.</i> [20]

Respecto al contenido de humedad, el elevado contenido de agua es característico de productos lácteos fermentados y del suero derivado de estos sistemas. Consecuentemente la presencia de sólidos totales puede relacionarse con proteínas, minerales y metabolitos producidos durante la fermentación, que favorecen la formación de matrices filmógenas más estables al combinarse con alginato de sodio [10]. En general, los resultados fisicoquímicos obtenidos evidencian que el suero de kéfir presentó características adecuadas para su empleo como componente bioactivo en la elaboración de películas con características de biodegradabilidad.

Caracterización microbiológica del suero de kéfir

La caracterización microbiológica realizada permitió evaluar la presencia de microorganismos patógenos y confirmar el desarrollo de microorganismos benéficos propios del kéfir. En las siembras realizadas en los diferentes medios selectivos para patógenos, no se observó crecimiento microbiano característico (Figura 1A), lo que sugiere ausencia de bacterias patógenas o indicadoras de contaminación fecal en el suero analizado.

La ausencia de crecimiento en agar MacConkey y EMB indica que no se detectaron bacterias coliformes gramnegativas fermentadoras de lactosa, mientras que la falta de desarrollo en agar Salmonella-Shigella sugiere ausencia de microorganismos entéricos patógenos pertenecientes a estos géneros [21]. Estos resultados pueden atribuirse al ambiente ácido generado durante la fermentación del kéfir, así como a la producción de compuestos antimicrobianos como ácidos orgánicos, peróxido de hidrógeno y bacteriocinas sintetizadas por las bacterias ácido-lácticas [22]. Por otro lado, las siembras realizadas en los agares nutritivo, PDA y Sabouraud, evidenciaron crecimiento microbiano compatible con bacterias ácido-lácticas y levaduras (Figura 1B). Las colonias

observadas presentaron morfologías circulares, cremosas y de tonalidades claras, características frecuentemente asociadas a microorganismos fermentativos presentes en sistemas de kéfir [23].

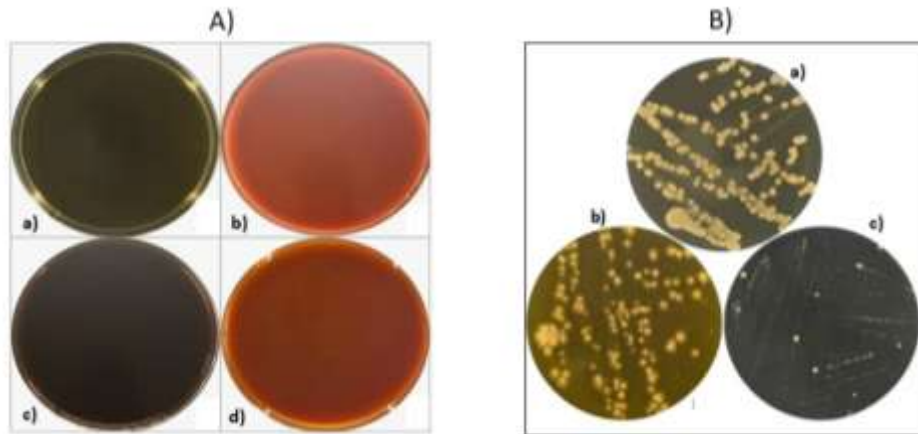


Figura 1. A) Ausencia de patógenos en el suero de kéfir a 48 h: a) Chromogenicagar, b) agar McConkey, c) Eosina Azul de Metileno, d) agar para Salmonella y Shigella y B) Presencia de BAL y levaduras en el suero de kéfir a 48 h: a) agar Sabouraud, b) agar Nutritivo y c) PDA.

La presencia simultánea de bacterias ácido-lácticas y levaduras es fundamental en la fermentación del kéfir, ya que ambos grupos microbianos establecen relaciones simbióticas que favorecen la producción de metabolitos bioactivos y las propiedades funcionales del sistema [8]. Diversos estudios han reportado que los microorganismos presentes en el kéfir poseen capacidad antimicrobiana, antioxidante y potencial probiótico; estas características podrían transferirse parcialmente al material polimérico para la formación de películas o *films*, desarrolladas a partir de suero fermentado [7]. En este sentido, los resultados microbiológicos obtenidos permiten considerar que el suero de kéfir empleado presentó una adecuada calidad microbiológica y un potencial funcional para su aplicación en el desarrollo de biopelículas, con uso potencial en empaques de alimentos.

Síntesis y caracterización morfológica de las biopelículas

Las biopelículas elaboradas a partir de suero de kéfir y alginato de sodio presentaron características físicas homogéneas tras los procesos de secado y entrecruzamiento con cloruro de calcio. Visualmente, las películas obtenidas presentaron una apariencia translúcida, continuidad estructural y flexibilidad moderada, además de una coloración ligeramente amarillenta atribuible a los compuestos presentes en el suero de kéfir (Figura 2). Estas características son similares a las reportadas para películas elaboradas con polisacáridos y matrices proteicas, las cuales suelen presentar transparencia y uniformidad superficial cuando existe una adecuada interacción entre sus componentes sin una separación de fases [3].

La incorporación del suero de kéfir favoreció la formación de una matriz polimérica compleja, debida a la interacción entre proteínas, polisacáridos y metabolitos producidos durante la fermentación [10]. Diversos autores han señalado que la combinación de compuestos proteicos y polisacáridos mejora las propiedades estructurales y mecánicas de las biopelículas, promoviendo una mayor

cohesión intermolecular y la estabilidad de la red polimérica, mejorando sus propiedades mecánicas [4].

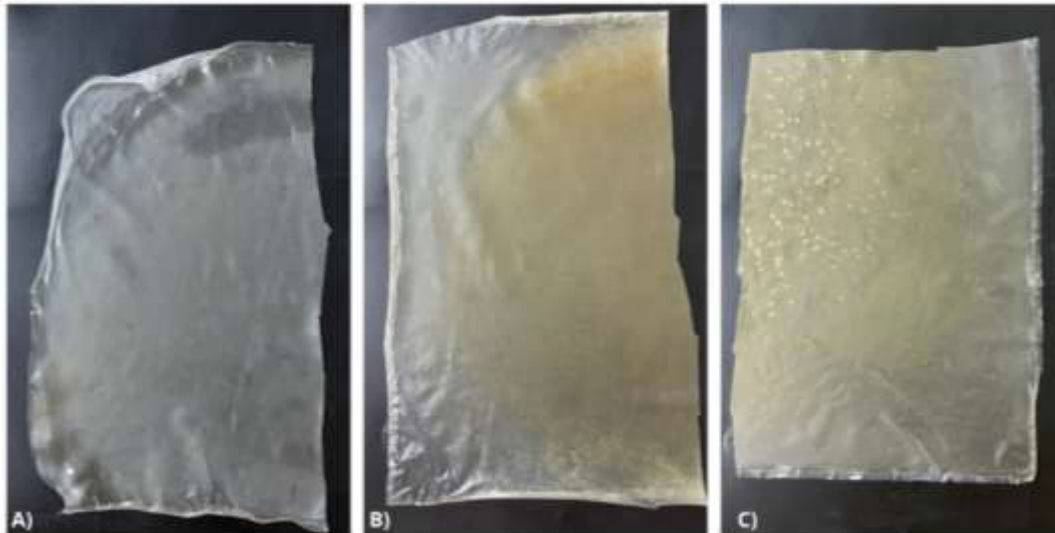


Figura 2. Comparación visual de biopelículas obtenidas a partir de mezclas de alginato de sodio y suero de kéfir en distintas proporciones. (A) 90:10, (B) 70:30, (C) 50:50.

Asimismo, el entrecruzamiento con cloruro de calcio permitió estabilizar la estructura del alginato mediante la formación de enlaces iónicos entre los grupos carboxilo y los iones de calcio, lo que favoreció la resistencia e integridad de las películas obtenidas [5]. Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado en películas con matrices de alginato, donde el calcio forma una estructura tipo *caja de huevo*, lo que incrementa la rigidez y la estabilidad del material [3].

Caracterización microscópica de las biopelículas

La evaluación microscópica realizada a diferentes aumentos (10x, 40x y 100x) permitió observar cambios en la morfología superficial y estructura interna de las biopelículas sintetizadas (Figura 3). Con aumentos de 10x, las muestras mostraron una distribución relativamente homogénea, aunque se observaron pequeñas partículas y zonas irregulares dispersas en la matriz filmógena. A 40x se observó una superficie más rugosa y heterogénea, con estructuras granulares y zonas de mayor densidad. Este comportamiento puede relacionarse con la interacción entre las proteínas del suero y el alginato de sodio, lo que da lugar a una red tridimensional más compacta. Estudios previos han demostrado que la incorporación de componentes proteicos en películas de polisacáridos modifica significativamente la microestructura superficial, aumentando la rugosidad y la heterogeneidad del material [10]. Finalmente, a 100x se evidenció una estructura más compacta, con presencia de aglomerados distribuidos a lo largo de toda la matriz. La ausencia de grietas pronunciadas o de separaciones estructurales indica una adecuada compatibilidad entre los componentes de la formulación. Resultados similares han sido reportados en biopelículas elaboradas con alginato y compuestos bioactivos, en donde, la interacción intermolecular favorece la formación de matrices continuas y estables [11].

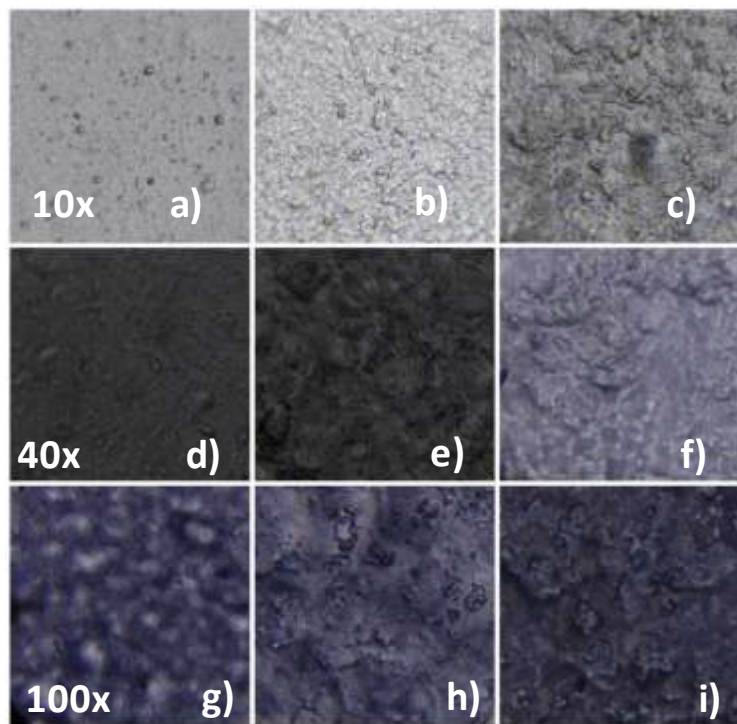


Figura 3. Comparación morfológica de películas alginato-suero a diferentes proporciones y aumentos: 90:10 (a, d, g), 70:30 (b, e, h) y 50:50 (c, f, i).

La heterogeneidad observada microscópicamente se relaciona con la presencia de sólidos suspendidos, proteínas y metabolitos procedentes del suero de kéfir. Sin embargo, dichas irregularidades no comprometieron la integridad general de las películas, por lo que las biopelículas obtenidas mostraron potencial para aplicaciones como materiales homogéneos y sin separación de fases, siendo ambos biopolímeros morfológicamente compatibles [12].

Trabajo a futuro

Se continuará con la caracterización de las biopelículas desarrolladas a partir de suero de kéfir y alginato de sodio, con la finalidad de determinar las propiedades estructurales y mecánicas resultantes de la combinación de ambos biopolímeros. Asimismo, se evaluará su potencial aplicación como material biodegradable para empaque de alimentos.

Conclusiones

Se obtuvieron biopelículas a partir de suero de kéfir y alginato de sodio mediante el método de *casting*, con integridad estructural adecuada y una apariencia homogénea. La caracterización fisicoquímica del suero de kéfir mostró valores dentro de los rangos reportados en la literatura, lo que indica un proceso de fermentación adecuado y la presencia de compuestos funcionales útiles para la formación de películas con uso potencial en empaques primarios de alimentos. El análisis microbiológico confirmó la ausencia de microorganismos patógenos y evidenció la presencia de bacterias ácido-lácticas y levaduras características del kéfir, lo que demuestra una adecuada calidad



microbiológica del sistema fermentado. Finalmente, la evaluación morfológica por microscopía óptica mostró películas continuas y compactas, con ligeras irregularidades superficiales asociadas a la interacción entre el alginato y los componentes del suero de kéfir. Los resultados obtenidos indican que el suero de kéfir tiene potencial para ser utilizado en el desarrollo de biopelículas biodegradables con posible aplicación como empaques activos para alimentos.

Referencias

- [1] L. K. Ncube, A. U. Ude, E. N. Ogunmuyiwa, R. Zulkifli and I. N. Beas, "An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries," *Recycling*, vol. 6, no. 1, pp. 1-25, 2021.
- [2] L. S. Dilkes-Hoffman, S. Pratt, P. A. Lant and B. Laycock, "The role of biodegradable plastic in solving plastic solid waste accumulation," in *Plastics to Energy*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, pp. 469–505, 2019.
- [3] T. S. Parreidt, K. Müller and M. Schmid, "Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications," *Foods*, vol. 7, no. 10, article 170, 2018.
- [4] V. Falguera, J. P. Quintero, A. Jiménez, J. A. Muñoz and A. Ibarz, "Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 22, no. 6, pp. 292–303, 2011.
- [5] K. Y. Lee and D. J. Mooney, "Alginate: Properties and biomedical applications," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 1, pp. 106–126, 2012.
- [6] J. W. Rhim, "Physical and mechanical properties of water resistant sodium alginate films," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 37, no. 3, pp. 323–330, 2004.
- [7] N. F. Azizi, M. R. Kumar, S. K. Yeap, J. O. Abdullah, M. Khalid, A. R. Omar, M. A. Osman, S. A. S. Mortadza and N. B. Alitheen, "Kefir and its biological activities," *Foods*, vol. 10, no. 6, article 1210, 2021.
- [8] M. R. Prado, L. M. Blandón, L. P. S. Vandenberghe, C. Rodrigues, G. R. Castro, V. Thomaz-Soccol and C. R. Soccol, "Milk kefir: Composition, microbial cultures, biological activities, and related products," *Frontiers in Microbiology*, vol. 6, article 1177, 2015.
- [9] S. Ganiari, E. Choulitoudi and V. Oreopoulou, "Edible and active films and coatings as carriers of natural antioxidants for lipid food," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 68, pp. 70–82, 2017.
- [10] B. Hassan, S. A. S. Chatha, A. I. Hussain, K. M. Zia and N. Akhtar, "Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 109, pp. 1095–1107, 2018.
- [11] N. Li, Y. Cheng, Z. Li, T. Yue and Y. Yuan, "An alginate-based edible coating containing lactic acid bacteria extends the shelf life of fresh strawberry," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 274, article 133273, 2024.
- [12] P. T. S. Melo, F. A. Aouada and M. R. Moura, "Active biodegradable packaging: Current status and future perspectives," *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 33, p. 100884, 2022.
- [13] E. M. Yahia, J. M. Fonseca and L. Kitinoja, "Postharvest losses and waste," in *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*, E. M. Yahia, Ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, pp. 43–69, 2019.



- [14] A. Valdés, N. Burgos, A. Jiménez and M. C. Garrigós, "Natural additives and agricultural wastes in biopolymer formulations for food packaging," *Frontiers in Chemistry*, vol. 3, article 6, 2015.
- [15] A. M. O. Leite, M. A. L. Miguel, R. S. Peixoto, A. S. Rosado, J. T. Silva and V. M. F. Paschoalin, "Microbiological, technological and therapeutic properties of kefir: A natural probiotic beverage," *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 44, no. 2, pp. 341–349, 2013.
- [16] E. R. Farnworth, "Kefir – a complex probiotic," *Food Science and Technology Bulletin: Functional Foods*, vol. 2, no. 1, pp. 1–17, 2005.
- [17] G. L. Garrote, A. G. Abraham and G. L. De Antoni, "Chemical and microbiological characterisation of kefir grains," *Journal of Dairy Research*, vol. 68, no. 4, pp. 639–652, 2001.
- [18] K. T. Magalhães, G. V. M. Pereira, D. R. Dias and R. F. Schwan, "Microbial communities and chemical changes during fermentation of sugary Brazilian kefir," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 27, pp. 1241–1250, 2011.
- [19] S. Otles and O. Cagindi, "Kefir: A probiotic dairy-composition, nutritional and therapeutic aspects," *Pakistan Journal of Nutrition*, vol. 2, no. 2, pp. 54–59, 2003.
- [20] R. F. Schwan, K. T. Magalhães-Guedes, D. R. Dias and G. V. M. Pereira, "Kefir and health: A contemporary perspective," *Food Research International*, vol. 76, pp. 504–511, 2015.
- [21] J. M. Jay, M. J. Loessner and D. A. Golden, "Modern food microbiology and foodborne microorganisms," in *Modern Food Microbiology*, 7th ed. New York, NY, USA: Springer, pp. 39–61, 2005.
- [22] J. R. Liu, S. Y. Wang, M. J. Chen, H. L. Chen, P. Y. Yueh and C. W. Lin, "Hypocholesterolaemic effects of milk-kefir and soyamilk-kefir in cholesterol-fed hamsters," *British Journal of Nutrition*, vol. 87, no. 5, pp. 471–476, 2002.
- [23] R. C. Witthuhn, T. Schoeman and T. J. Britz, "Characterisation of the microbial population at different stages of kefir production and kefir grain mass cultivation," *International Dairy Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 383–389, 2005.



Efecto del oleogel con borra de café en chocolate semiamargo: textura y análisis sensorial

G. Avendaño Vásquez^{1*}, E. C. Varela Santos¹, K. A. Vargas García¹, K. Bustos Ramírez, J. R. González Romero¹

¹TecNM /ITS de Tierra Blanca, Maestría en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología, Tierra Blanca, Veracruz, México.

¹TecNM /ITS de Tierra Blanca, Ingeniería Mecatrónica, Tierra Blanca, Veracruz, México.

*gilda.av@itstb.edu.mx

Artículo: científico

Resumen

La modificación de la fase grasa en chocolate es una estrategia para mejorar su funcionalidad y sostenibilidad. En este estudio, se evaluó la sustitución de manteca de cacao por un oleogel enriquecido con borra de café, rica en antioxidantes. Se entrenó un panel sensorial para evaluar atributos como textura, dureza, fundencia y perfil aromático en chocolates semiamargos. Los resultados mostraron que el uso de oleogel modificó la dureza y la fundencia, debido a cambios en la estructura y cristalización de la fase lipídica. Asimismo, se identificaron variaciones en aroma y sabor por la incorporación de compuestos de la borra de café. A pesar de estas diferencias, el chocolate con oleogel presentó una aceptabilidad comparable al convencional, destacando su potencial como alternativa funcional y sostenible mediante el aprovechamiento de subproductos agroindustriales.

Introducción

Tradicionalmente el uso de manteca de cacao en la elaboración de chocolate ha sido esencial para conferir propiedades sensoriales como brillo, textura, dureza y fundencia, asociadas a su particular comportamiento de cristalización polimórfica [1]. Sin embargo, factores como su alto costo, disponibilidad limitada y susceptibilidad a variaciones en la calidad han impulsado la búsqueda de alternativas lipídicas que mantengan la funcionalidad tecnológica del chocolate sin comprometer su aceptación [2]. En este contexto, la estructuración de aceites líquidos mediante oleogelación ha emergido como una estrategia prometedora, al permitir la formación de redes tridimensionales capaces de imitar las propiedades físicas de las grasas sólidas [3].

Los oleogeles han sido ampliamente estudiados en sistemas alimentarios debido a su capacidad para modular la textura, estabilidad y perfil nutricional, al reducir el contenido de grasas saturadas y permitir la incorporación de compuestos bioactivos [4]. En particular, el aprovechamiento de subproductos agroindustriales como la borra de café representa una oportunidad para el desarrollo de ingredientes funcionales, ya que este residuo contiene compuestos fenólicos con actividad antioxidante, además de contribuir a estrategias de economía circular [5].

No obstante, la modificación de la fase grasa en chocolate implica desafíos importantes, debido a la complejidad de su microestructura y a la estrecha relación entre la fracción lipídica y los atributos sensoriales del producto final [6]. Cambios en la composición de la grasa pueden afectar la cristalización, la reología y la liberación de compuestos aromáticos, lo que repercute directamente en la percepción del consumidor [7]. Por ello, el análisis sensorial, mediante paneles entrenados, resulta una herramienta clave para evaluar la viabilidad de nuevas formulaciones y entender las implicaciones de estas modificaciones [8].

Por lo anterior, el objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de la sustitución parcial de manteca de cacao por un oleogel enriquecido con borra de café en las propiedades sensoriales de un chocolate semiamargo, considerando tanto los cambios estructurales en la fase lipídica como su impacto en la percepción del consumidor.

Metodología

Materiales

Manteca de cacao (Santa Helena Superfoods, Ver.), Azúcar estándar, Polvo de cacao Natural sin endulzar 100% cacao (Hershey's, USA) y Lecitina de soya como emulsionante (Laboratorios Best, S.A., México), adquiridos del comercio local fueron empleados para las formulaciones de chocolate. Aceite de soya (NUTRIOLI Ragasa Industrias, SA de CV), así como, cera de candelilla (Alkento Ingredientes, Monterrey - NL, México) fueron empleados para la elaboración de oleogeles.

Enriquecimiento de aceite comestible

Se realiza una dispersión de la borra del café en una relación 1:10 p/p en aceite comestible, el cual se lleva a baño ultrasónico a 50°C por 20min. Seguidamente es separado de la borra mediante filtración en papel, se monitorea el índice de peróxidos por el método AOAC Cd 8-53 [8] y se almacena en frascos ámbar en refrigeración.

Formulación de oleogeles

Se prepararon oleogeles al 5 % p/p utilizando aceite de soya enriquecido. La mezcla se calentó hasta 80 °C bajo agitación (200 rpm) durante 15 min. Posteriormente, se almacenó durante 48 h a 4 ± °C para promover la cristalización completa, cubierta con papel aluminio para evitar la exposición a la luz.

Preparación de la barra de chocolate

Se llevó a cabo la fusión de la fase grasa considerando los niveles de sustitución de manteca de cacao por oleogel (25, 30 y 50 %) tabla 1. Posteriormente, se incorporaron la cocoa en polvo, la lecitina y, finalmente, el azúcar previamente pulverizada, en un sistema isotérmico a 70 ± 2 °C, bajo agitación constante durante 15 min. La temperatura se disminuyó a 60 °C durante 2 h y, la mezcla se enfrió hasta 45 °C para el proceso de moldeado. Finalmente, las barras se almacenaron a 4 °C durante 24 h.

Tabla 1. Formulación de barras de chocolate con diferentes niveles de sustitución de manteca de cacao por oleogel

Tratamiento	Manteca de cacao (%)	Oleogel (%)	Sustitución de grasa (%)
T1	75	25	25
T2	70	30	30
T3	50	50	50



Medición de dureza

Las mediciones de dureza se realizaron mediante el método de penetrómetro (AGY-30, HFBTE, China). Estas mediciones se efectuaron en la superficie de la muestra hasta alcanzar la deformación irreversible en un corte transversal. Todas las muestras fueron analizadas por quintuplicado.

Aplicación de la evaluación sensorial

El panel sensorial estuvo conformado por 10 jueces entrenados. Durante esta etapa, los jueces evaluaron atributos de sabor (dulzura, amargor, acidez, intensidad de cacao, persistencia y sensación grasosa), así como atributos de textura (dureza, cohesividad, elasticidad, masticabilidad y gomosidad) y apariencia (brillo y uniformidad). Las muestras fueron codificadas y presentadas en orden aleatorio. Se utilizó una escala estructurada de intensidad (0–10), lo que permitió a los jueces reconocer diferencias entre muestras y comprender el uso de la escala. La consistencia de las respuestas fue verificada para asegurar la aptitud del panel.

Las muestras fueron codificadas con números aleatorios de tres dígitos y presentadas de forma cegada y en orden aleatorio. Los jueces evaluaron los mismos atributos definidos en el entrenamiento utilizando una escala estructurada de intensidad (0–10). Adicionalmente, se aplicó una prueba de aceptación hedónica de 9 puntos. Las evaluaciones se llevaron a cabo bajo condiciones controladas de temperatura, iluminación y ventilación. Para evitar la fatiga sensorial y el arrastre de sabor, los jueces realizaron limpieza del paladar con agua entre muestras y se controló el número de evaluaciones por sesión [9].

Análisis de datos

Los datos de penetración se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, considerando como factor el nivel de sustitución de la fase grasa. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$), se aplicó una prueba de comparación múltiple de medias (Tukey).

En el caso de la evaluación sensorial, los resultados se analizaron de manera descriptiva mediante el cálculo de promedios de intensidad y su representación gráfica, con el fin de identificar tendencias en el perfil sensorial de las formulaciones.

Resultados y discusión

Enriquecimiento del aceite

De acuerdo con la metodología empleada, el aceite enriquecido presentó un incremento en el valor de peróxidos, pasando de 0.07 ± 0.1 meq/kg en el aceite sin enriquecer a 0.53 ± 0.4 meq/kg en el aceite enriquecido con borra de café. Este aumento sugiere una mayor susceptibilidad a la oxidación inicial, posiblemente asociada a la incorporación de compuestos prooxidantes o a la exposición térmica durante el proceso de enriquecimiento [10].

No obstante, la borra de café es una fuente reconocida de compuestos fenólicos con actividad antioxidante, por lo que su incorporación también podría contribuir a mejorar la estabilidad oxidativa a largo plazo. En este sentido, el comportamiento observado podría reflejar un equilibrio entre procesos prooxidantes iniciales y el efecto protector de los compuestos bioactivos presentes

en la matriz [11], lo cual resulta relevante para su aplicación en sistemas estructurados como los oleogees. No obstante, el índice de peróxido se mantuvo constante durante todo el almacenamiento[12].

Propiedades texturales del chocolate

Las formulaciones con 25 y 30 % de sustitución presentaron un aspecto visual adecuado; sin embargo, la formulación con 50 % no mostró la estabilidad estructural requerida para este tipo de producto, por lo que fue descartada. Este hallazgo coincide con estudios previos que señalan que sustituciones superiores al 40% tienden a comprometer la integridad estructural del chocolate [13].

La resistencia a la penetración de las formulaciones de chocolate se evaluó como un indicador de la estructura mecánica asociada a la fase grasa (Figura 1). La muestra elaborada con manteca de cacao presentó una fuerza de penetración promedio de 5.55 ± 0.34 kgf, utilizada como referencia del comportamiento estructural convencional del chocolate.

La formulación con 25 % de sustitución mostró el valor más alto de resistencia (6.37 ± 0.77 kgf), lo que sugiere una estructura más rígida, posiblemente asociada a una mayor interacción entre la red cristalina de la manteca de cacao y el sistema estructurado del oleogel. En contraste, la muestra con 30 % de sustitución presentó un valor intermedio (5.92 ± 0.93 kgf), cercano al control, lo que indica un comportamiento mecánico similar al del chocolate tradicional. Adicionalmente se ensayó una formulación con 35 % de sustitución exhibió una menor resistencia a la penetración (5.34 kgf), lo que sugiere una disminución en la integridad estructural del sistema.

Este comportamiento evidencia que niveles intermedios de sustitución (25–30%) favorecen la formación de una red estructural más estable, mientras que incrementos mayores pueden generar una ruptura en la continuidad de la fase cristalina, afectando negativamente las propiedades mecánicas del chocolate. Estos resultados son consistentes con la limitación observada en formulaciones con mayor contenido de oleogel, donde no fue posible mantener la estructura del producto[14].

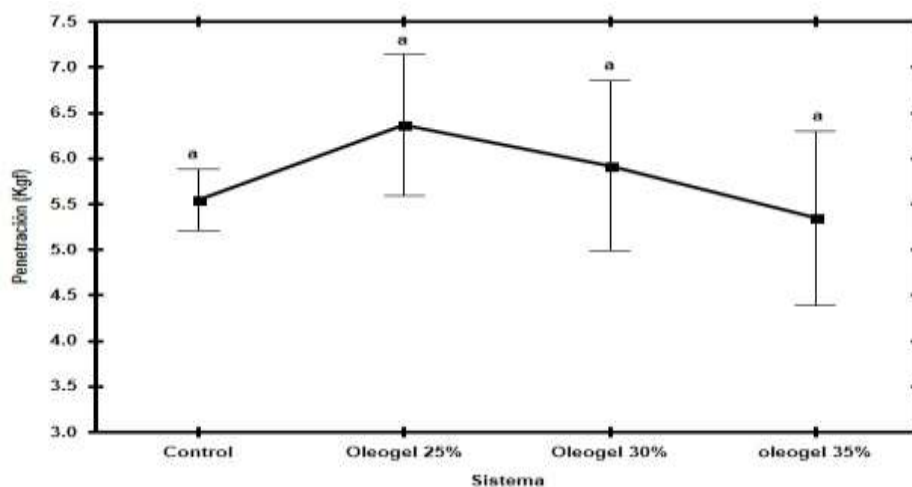


Figura 1. Valores de penetración (kgf) de las diferentes formulaciones de chocolate: control (manteca de cacao) y muestras con sustitución parcial por oleogel (25, 30 y 35 %). Los resultados se presentan como media \pm desviación estándar. Letras iguales significan que no hubo diferencias significativa ($p > 0.05$).

Evaluación sensorial

Debido a la poca estructuración que presentó la muestra del 35% de sustitución de la manteca de cacao, se decidió evaluar los sistemas del 25 y 30% de sustitución (Figura 2).

Se observaron diferencias en el perfil sensorial entre las formulaciones, evidenciando variaciones en el balance de los atributos de sabor. En general, las muestras con menor contenido de grasa tienden a presentar mayor intensidad de cacao, acidez y persistencia del sabor, mientras que las formulaciones con mayor contenido graso muestran una mayor percepción de sensación grasosa y un perfil más equilibrado entre dulzura y amargor. Estos resultados sugieren que la modificación de la fase lipídica influye en la liberación y percepción de compuestos de sabor, afectando el perfil sensorial global del chocolate.

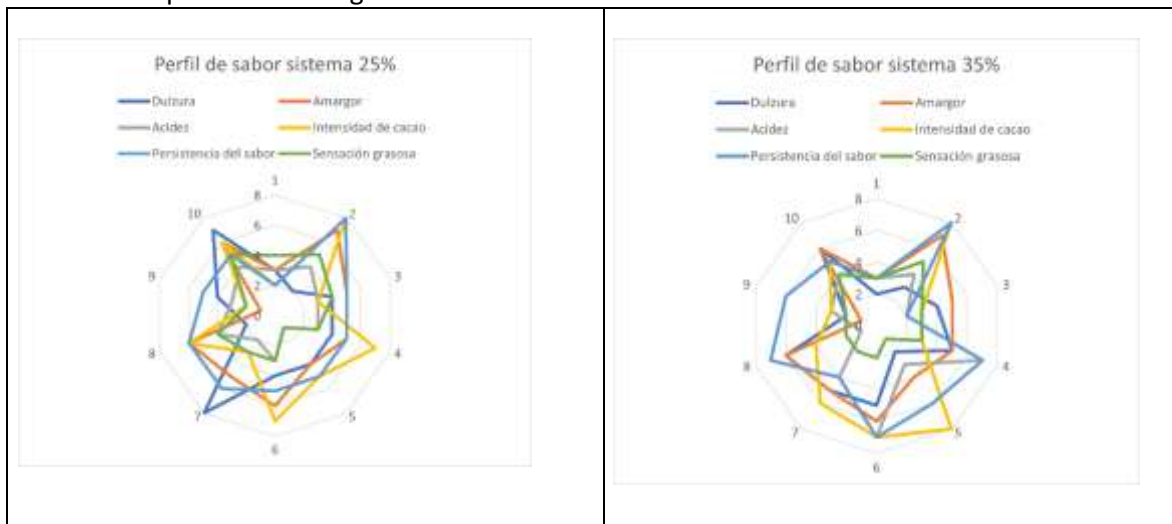


Figura 2. Perfil de sabor de las muestras de chocolate evaluadas mediante análisis sensorial descriptivo. Se presentan los atributos dulzura, amargor, acidez, intensidad de cacao, persistencia del sabor y sensación grasosa, evaluados en una escala de intensidad de 0 a 10.

Asimismo, se identifican variaciones en el balance dulzura–amargor, lo cual podría estar relacionado tanto con la dilución de sólidos no grasos como con la presencia de compuestos derivados de la borra de café incorporada en el oleogel. Estos compuestos, particularmente los fenólicos, pueden contribuir a notas amargas y a una mayor intensidad sensorial del cacao [5].

Desde una perspectiva integral, estos resultados sugieren que la sustitución parcial de la fase grasa no modifica de manera significativa las propiedades mecánicas del chocolate; sin embargo, sí induce cambios relevantes en el perfil sensorial, especialmente en atributos como la intensidad y la persistencia del sabor. Este comportamiento evidencia un desacople entre las propiedades estructurales medidas instrumentalmente y la percepción sensorial del consumidor, fenómeno previamente reportado en sistemas lipídicos estructurados mediante oleogeles [3]. Dicho desacople resalta la importancia de considerar la evaluación sensorial como un complemento indispensable en el desarrollo de alimentos funcionales.

Adicionalmente, la evaluación sensorial de la textura (Figura 3) evidenció que la sustitución parcial de la manteca de cacao por oleogel influye en la percepción de atributos mecánicos del chocolate, tales como dureza, cohesividad, masticabilidad y gomosidad. Estas variaciones están directamente relacionadas con los cambios en la estructura de la fase grasa y su comportamiento durante la deformación en boca [1,2]. Las formulaciones con mayor contenido de oleogel tendieron a presentar modificaciones en la percepción de la dureza y la cohesividad, lo cual puede atribuirse a diferencias en la organización de la red lipídica en comparación con la manteca de cacao.

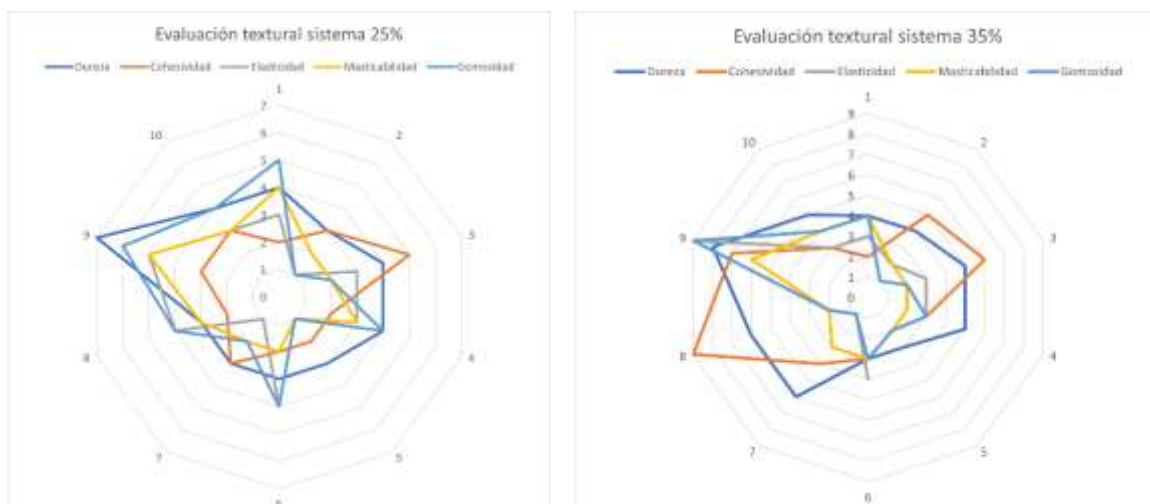


Figura 3. Perfil de textura de las muestras de chocolate evaluadas mediante análisis sensorial descriptivo. Se presentan los atributos de dureza, cohesividad, elasticidad, masticabilidad y gomosidad, evaluados en una escala de intensidad de 0 a 10.

A diferencia de esta última, que presenta un comportamiento cristalino bien definido, los oleogeles forman estructuras tridimensionales basadas en agentes estructurantes que pueden generar redes menos continuas o con diferente resistencia mecánica [3]. Asimismo, la percepción de atributos como masticabilidad y gomosidad puede estar asociada a la forma en que la fase grasa interactúa con los sólidos del sistema, afectando la desintegración del chocolate durante su consumo. En este sentido, la modificación de la fase lipídica puede alterar la cinética de fusión y la lubricación en boca, factores clave en la experiencia sensorial del producto [4]. Es importante destacar que, aunque instrumentalmente no se observaron diferencias significativas en la resistencia a la penetración, los jueces sensoriales sí percibieron variaciones en la textura. Este resultado sugiere que la evaluación sensorial es más sensible a cambios sutiles en la microestructura del sistema, evidenciando un desacople entre las mediciones instrumentales y la percepción humana [5].

En conjunto, los resultados indican que la incorporación de oleogeles permite mantener propiedades mecánicas comparables a las del chocolate convencional, aunque con modificaciones perceptibles en la textura, lo cual debe ser considerado en el diseño de formulaciones con sustitución parcial de grasa.

Trabajo a futuro

Como trabajo futuro, se propone profundizar en la caracterización del sistema mediante el análisis del comportamiento térmico y estructural de la fase lipídica (por ejemplo, DSC y microscopía), así como evaluar la estabilidad oxidativa del producto final, con el fin de comprender mejor la interacción entre el oleogel y la matriz del chocolate.

Conclusiones

El uso de oleogeles como sustitutos parciales de manteca de cacao en formulaciones de chocolate amargo representa una alternativa prometedora para modificar el perfil lipídico del producto sin comprometer significativamente sus propiedades sensoriales ni estructurales. Los oleogeles permitieron mantener la textura, dureza y estabilidad del chocolate, al tiempo que ofrecen la posibilidad de incorporar aceites con perfiles nutricionales más saludables. Sin embargo, concentraciones elevadas de sustitución pueden afectar la resistencia al almacenamiento y la cristalización polimórfica del chocolate, por lo que es recomendable optimizar la proporción de sustitución y realizar ajustes en el proceso de conchado y temperado. En general, los oleogeles



constituyen una herramienta versátil para el desarrollo de chocolates funcionales y con mayor valor nutricional, con potencial de aplicación industrial.

Referencias

- [1] S. T. Beckett, Ed., *Industrial Chocolate Manufacture and Use*. Wiley, 2008. doi: 10.1002/9781444301588.
- [2] Nissim Garti and K. Sato, Eds., *Crystallization Processes in Fats and Lipid Systems*, 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001. [Online]. Available: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781482270884_A38906139/preview-9781482270884_A38906139.pdf
- [3] A. R. Patel and K. Dewettinck, "Edible oil structuring: An overview and recent updates," *Food Funct.*, vol. 7, no. 1, pp. 20–29, 2016, doi: 10.1039/c5fo01006c.
- [4] Z. Farooq and J. Boye, "Novel Food and Industrial Applications of Pulse Flours and Fractions," in *Pulse Foods Processing, Quality and Nutraceutical Applications*, no. September, B. M. Brijesh K. Tiwari, Aoif Gowen, Ed., Oxford: Academic Press, 2011, pp. 283–323. doi: 10.1016/B978-0-1238-2018-1.00007-0.
- [5] S. I. Mussatto, E. M. S. Machado, S. Martins, and J. A. Teixeira, "Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 4, no. 5, pp. 661–672, Jul. 2011, doi: 10.1007/s11947-011-0565-z.
- [6] E. O. Afoakwa, *Chocolate Science and Technology*, 1st ed. United Kingdom: Wiley-Blackwell, 2010.
- [7] J. M. Aguilera, "Why food microstructure?," *J. Food Eng.*, vol. 67, no. 1–2, pp. 3–11, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.05.050.
- [8] P. Cunniff and AOAC International., *Official methods of analysis of AOAC international*, 16th ed. AOAC International., 1997.
- [9] H. Stone and J. L. Sidel, *Sensory Evaluation Practices*, 1st ed. Academic Press, 2004.
- [10] S. Núñez Correa, H. Pérez Pastenes, M. del C. C. D. María del Carmen Cuevas Díaz, O. Guzmán López, and A. M. R. Ana María Rueda, "Extracción De Aceites De La Borra De Café Para Fines Bioenergéticos," *J. Energy, Eng. Optim. Sustain.*, vol. 7, no. 3, pp. 189–200, 2023, doi: 10.19136/jeeos.a7n3.5689.
- [11] C. Andrade, R. Perestrelo, and J. S. Câmara, "Bioactive Compounds and Antioxidant Activity from Spent Coffee Grounds as a Powerful Approach for Its Valorization," *Molecules*, vol. 27, no. 21, p. 7504, Nov. 2022, doi: 10.3390/molecules27217504.
- [12] R. D. Vargas Sánchez, B. del M. Torres Martínez, G. R. Torrescano Urrutia, and A. Sánchez-Escalante, "Utilization of coffee silverskin aqueous extract for improving the oxidative stability of pork meat homogenates," *Biotechnia*, vol. 26, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.18633/biotechnia.v26i1.2128.
- [13] J. E. Valdivia-Culqui, J. L. Maicelo-Quintana, I. S. Cayo-Colca, M. Medina-Mendoza, E. M. Castro-Alayo, and C. R. Balcázar-Zumaeta, "Oleogel Systems for Chocolate Production: A Systematic Review," *Gels*, vol. 10, no. 9, p. 561, Aug. 2024, doi: 10.3390/gels10090561.
- [14] P. Sun *et al.*, "Characterization of functional chocolate formulated using oleogels derived from β -sitosterol with γ -oryzanol/lecithin/stearic acid," *Food Chem.*, vol. 360, p. 130017, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130017.



Dimensiones de la transición agroecológica: una aproximación en el trópico veracruzano

Julio Vilaboa-Arróniz^{a*}, Jorge Aguilar-Ávila^a, Enrique Genaro Martínez González^a

^a Centro Académico y de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM)-Universidad Autónoma Chapingo. Apdo. Post. Núm. 90, Carretera Federal México-Texcoco km. 38.5, Universidad Autónoma de Chapingo, 56227 El Cooperativo, Méx.

*julio.vilaboa@ciestaam.edu.mx

Resumen— Los procesos de transición agroecológica (TA) han sido abordados de manera fragmentada, lo que limita su comprensión e implementación. El objetivo fue construir un modelo analítico para interpretar la TA a partir de evidencia empírica. Se sistematizaron investigaciones desarrolladas en la Cuenca Baja del Papaloapan, Veracruz, relacionadas con el uso de herbicidas y la percepción hacia una TA en el marco de los programas agrícolas del Bienestar: Sembrando Vida (PSV), Producción para el Bienestar (PPB) y Fertilizantes para el Bienestar (PFB). Se integró información de 259 productores complementada con otros estudios relacionados. A partir de esta integración, se identificaron la gobernanza territorial, el modelo productivo y la racionalidad práctica como las dimensiones que sustentan el modelo propuesto. Se concluye que la TA es un proceso emergente desde el territorio, condicionado por la interacción entre estructuras institucionales, modelo productivo y decisiones de los productores.

Introducción

En México, la discusión en torno al uso de herbicidas ha intensificado el debate sobre la necesidad de transitar hacia esquemas productivos más sostenibles. El debate no se ha limitado a criterios técnicos, sino que ha involucrado disputas políticas, comerciales y científico-académicas en torno a su regulación [1]. En este contexto, la TA es un proceso que pasa de lo agronómico a lo multidimensional y que implica transformaciones institucionales, económicas y sociales [2]. No obstante, muchos estudios sobre la TA tienden a abordarla de manera fragmentada (política pública, económica o ecológica, entre otros). Esto limita la comprensión de cómo interactúan las distintas dimensiones que configuran el sistema productivo en un territorio específico.

Se propone un marco integrador con tres dimensiones: gobernanza territorial, modelo productivo y racionalidad práctica. La primera se entiende como el conjunto de arreglos institucionales y reglas formales e informales que estructuran la acción colectiva y orientan el uso de los recursos en un territorio determinado [3]. La segunda se refiere a la configuración estructural del sistema agrícola en términos de uso de insumos, dependencia tecnológica y lógica económica predominante [4]; y la tercera alude a los criterios y decisiones de los productores [5].

El objetivo es proponer y discutir un triángulo analítico que permita examinar la TA como un proceso de articulación entre estructuras institucionales, dinámicas productivas y decisiones cotidianas de los actores.

Este planteamiento no se desarrolla como un ejercicio exclusivamente teórico, sino que se sustenta en la sistematización de investigaciones empíricas realizadas en la Cuenca Baja del Papaloapan, Veracruz, en el marco de los programas agrícolas del Bienestar. A partir de evidencia de campo, análisis documental y estudios complementarios, se construye de manera inductiva el modelo propuesto, con el objetivo de comprender la transición agroecológica como un proceso territorial emergente. Así, este enfoque es consistente con planteamientos recientes que reconocen la naturaleza sistémica y contextual de la transición agroecológica [6,7].



Metodología

Se consideró como base de estudio el municipio de Cosamaloapan, ubicado en la Cuenca Baja del Papaloapan, Veracruz, que por sus características agroecológicas, así como por su importancia productiva y socioeconómica asociada al cultivo de la caña de azúcar (más de 24,000 hectáreas de superficie sembrada) [8], se considera representativo del trópico veracruzano.

El presente estudio se desarrolló a partir de la sistematización analítica de investigaciones empíricas realizadas en 2025 en el municipio, las cuales estuvieron enfocadas en el uso de herbicidas y la transición agroecológica, considerando como eje articulador los Programas Agrícolas para el Bienestar.

El tamaño de muestra en cada programa fue con base en su propia lógica operativa e institucional. En el caso del PPB, se utilizó un muestreo estratificado por superficie ($n=73$), acorde a su estructura de atención diferenciada por tipo de productor. Para el PFB, la muestra ($n=106$) se construyó a partir de un muestreo por conveniencia en el punto de entrega de los fertilizantes, lo cual responde a su dinámica operativa centrada en la distribución de insumos. En el caso de PSV ($n=80$), la selección se realizó a partir de Comunidades de Aprendizaje Campesino (CAC), en coherencia con su enfoque territorial y organizativo. Esta diferenciación metodológica permitió capturar la heterogeneidad de los programas sin forzar esquemas de muestreo homogéneos que no corresponden a su funcionamiento real. De esta manera la muestra total fue de 259 beneficiarios. La información fue recabada mediante entrevistas estructuradas, considerando variables relacionadas con el uso y manejo de herbicidas, prácticas productivas, criterios de decisión y condiciones económicas de producción y analizadas con Statistical Package for the Social Science (SPSS®).

De manera complementaria, se incorporó análisis documental del debate público en torno al uso de herbicidas, así como la identificación de vacíos de información sobre su uso por región y cultivo, además de la revisión de artículos científicos relacionados con esta temática en el estado de Veracruz. Esta información permitió integrar distintos niveles de análisis: institucional–regulatorio, estructural–productivo y práctico–productivo.

El procedimiento metodológico consistió en tres etapas: (1) revisión y análisis comparativo de literatura científica y documentos relevantes, identificando enfoques predominantes y vacíos analíticos; (2) integración temática de resultados empíricos provenientes de estudios de campo, análisis documental y modelación económica; y (3) construcción inductiva de un marco interpretativo, a partir de la identificación de patrones recurrentes en la información sistematizada.

Como resultado de este proceso, se derivaron tres dimensiones interrelacionadas: gobernanza territorial, modelo productivo y racionalidad práctica, las cuales estructuran el modelo propuesto. El enfoque adoptado es de carácter analítico–integrador, orientado a comprender la transición agroecológica como un proceso territorial emergente, más que como una simple sustitución tecnológica.

Resultados y discusión

La sistematización de investigaciones desarrolladas en el territorio objeto de estudio permitió identificar patrones recurrentes en el análisis de la transición agroecológica, los cuales se sintetizan en el Cuadro 1. Este integra distintas líneas temáticas abordadas en el territorio, así como sus niveles analíticos, mensajes centrales y aportes, permitiendo establecer una secuencia lógica de construcción del modelo propuesto.

Tabla 1. Líneas temáticas sistematizadas para el análisis de la transición agroecológica en la Cuenca Baja del Papaloapan, Veracruz

Título	Nivel analítico	Mensaje central	Aporte
El glifosato en los medios de comunicación: la batalla por la información pública	Institucional-regulatorio	La regulación del glifosato fue una disputa por la legitimidad científica y el control de la información.	Reubica el debate hacia la dimensión de gobernanza.
El uso de plaguicidas en México y el enfoque de logística inversa	Revisión estructural-sectorial	El uso de plaguicidas carece de información regionalizada y esquemas de gestión posconsumo.	Integra panorama productivo y vacío de política pública.
Coherencia institucional y co-influencia de políticas agrícolas	Institucional-territorial	La interacción de programas configura incentivos y trayectorias productivas.	Analiza arquitectura programática e incentivos.
Uso de herbicidas y transición agroecológica en el trópico mexicano	Práctico-productivo	La transición depende de decisiones reales de manejo.	Profundiza en prácticas agrícolas situadas.
Racionalidad práctica y manejo de herbicidas en programas agrícolas del Bienestar en México	Teórico-interpretativo	El uso de herbicidas responde a una racionalidad situada.	Desarrolla fundamento conceptual del manejo.
Unidades típicas para estimar costos en caña de azúcar	Económico-productivo	No hay transición viable sin sustentabilidad financiera.	Incorpora dimensión económica al análisis.
Dinámica de las redes sociales de la agroindustria cañera	Relacional-sistémico	La estructura de relaciones condiciona decisiones productivas.	Integra análisis de poder y flujos de información.
Enfoques dominantes y vacíos analíticos sobre herbicidas en Veracruz	Revisión crítica-comparativa	Predomina enfoque toxicológico y se descuida manejo socio-técnico.	Fundamenta necesidad de enfoque integrador.

A partir de esta integración, se derivaron tres dimensiones analíticas interrelacionadas: gobernanza territorial, modelo productivo y racionalidad práctica, las cuales permiten comprender la transición agroecológica como un proceso que no puede explicarse desde un único nivel de análisis.

En la dimensión de gobernanza territorial, la evidencia muestra que la regulación del uso de herbicidas, el debate público sobre su legitimidad científica-académica y la interacción entre programas agrícolas configuran los incentivos institucionales que orientan las prácticas productivas.



Aunado a ello, se identificó una superposición de apoyos entre programas. En el caso de PFB, el 36% de los productores no recibe otro tipo de apoyo, mientras que el 64% participa en al menos un programa adicional, destacando PPB (36%), PSV (7%) y apoyos sociales como Adultos Mayores (15%), así como combinaciones de más de dos programas (7%). Para PPB, el 68% de los productores participa en otro programa, de los cuales el 34% recibe apoyos de PFB, el 17% de PSV, el 12% del programa de Adultos Mayores y el 11% en más de dos programas; mientras que en Sembrando Vida, el 45% de los productores participa exclusivamente en este programa, mientras que el 55% restante recibe apoyos adicionales: el 22.5% también participa en Fertilizantes para el Bienestar, el 10% en Producción para el Bienestar, el 5% en los tres programas simultáneamente, y el resto en combinaciones con apoyos sociales como Adultos Mayores (12.5%) u otras actividades (5.1%). Estos resultados evidencian que los productores pueden ser beneficiarios simultáneamente de múltiples programas, lo que genera una superposición de apoyos e incentivos que no necesariamente están alineados hacia la transición agroecológica, reforzando la persistencia del modelo productivo convencional. Con relación a este tema, se identificó que los programas se encuentran presentes en el territorio, pero sin articulación entre ellos, lo que limita la generación e implicación de una política integral ya que cada programa cuenta con su objetivo definido, beneficio u apoyo otorgado, así como su esquema de operación. Por lo que en se encontró superposición de apoyos otorgados debido a que atienden a una misma población objetivo. Además, que se ha generado una dependencia hacia este tipo de apoyos los cuales son utilizados para solventar necesidades inmediatas por parte de los productores; y, finalmente cierto roce social por la permanencia o salida de los padrones de beneficiarios.

En la dimensión del modelo productivo, los resultados demuestran una fuerte dependencia de insumos externos, principalmente de fertilizantes y herbicidas, así como restricciones económicas que limitan la adopción de alternativas productivas. Se encontró que los productores utilizan alrededor de 23 marcas comerciales de herbicidas, predominando ingredientes activos como glifosato, Paraquat y 2,4-D amina en los tres programas analizados. Asimismo, se identificó la existencia de entre tres y cinco combinaciones posibles de productos, así como una persistencia en su uso que supera los 20 años, lo que evidencia una fuerte dependencia de estos insumos dentro del modelo productivo.

En este sentido, la información derivada de los estudios de campo muestra que la viabilidad económica constituye un factor determinante, ya que los productores priorizan prácticas que aseguren estabilidad productiva, aun cuando existan propuestas de transición agroecológica. En este sentido, el cambio no depende únicamente de la disposición individual, sino de las condiciones estructurales del sistema agrícola.

Por su parte, la dimensión de la racionalidad práctica refleja que las decisiones de manejo agrícola responden a condiciones situadas y contextos específicos. En cuanto a la determinación de la dosis de herbicidas, se identificó un predominio claro de criterios empíricos sobre los técnicos formales. En el caso de los beneficiarios del Programa Producción para el Bienestar, poco más de la mitad de los productores (52%) determinan la dosis con base en su experiencia propia, mientras que entre el 37% y 40% lo hacen a partir de recomendaciones en puntos de venta de agroquímicos. En contraste, el uso de indicaciones del envase o la referencia a otros productores es marginal ($\leq 12\%$). En el caso de PSV el uso de herbicidas se enfoca a actividades específicas en las labores agrícolas y el PFB se

encuentra una alta asociación fertilizantes-herbicidas que reproduce el modelo productivo convencional en la caña de azúcar.

La articulación de estas tres dimensiones permitió construir el triángulo analítico propuesto (Figura 1), el cual sintetiza la interacción entre estructuras institucionales, condiciones productivas y decisiones de los productores.

Los resultados muestran que la transición agroecológica ocurre cuando existe coherencia entre estas dimensiones; en su ausencia, el sistema tiende a reproducir el modelo convencional. De esta forma, el enfoque propuesto desplaza el análisis centrado en insumos hacia la comprensión del sistema territorial que condiciona las prácticas productivas.



Figura 1. Dimensiones necesarias para la transición agroecológica en la Cuenca Baja del Papaloapan, Veracruz

La evidencia obtenida muestra que la transición agroecológica no puede explicarse únicamente desde la adopción de prácticas alternativas, sino como resultado de la interacción entre factores institucionales, productivos y sociales. En este sentido, los resultados coinciden con enfoques que plantean la transición agroecológica como un proceso sistémico, donde la transformación depende de la coherencia entre distintos niveles del sistema agrícola [6,9].

La persistencia en el uso de herbicidas, así como la desarticulación entre programas, evidencian que los incentivos institucionales actuales no están alineados hacia una transición integral, lo que limita su alcance en el territorio. Asimismo, la importancia de la racionalidad práctica observada en los productores confirma que las decisiones agrícolas no responden exclusivamente a criterios técnicos, sino a condiciones situadas, percepciones de riesgo y restricciones económicas. Este hallazgo es consistente con lo planteado por Long [5] y con estudios recientes que destacan el papel del contexto territorial en la toma de decisiones productivas [10]. En conjunto, estos elementos refuerzan la necesidad de analizar la transición agroecológica desde un enfoque territorial e integrador, donde el cambio no depende únicamente de la voluntad individual, sino de la reconfiguración de las condiciones estructurales del sistema productivo.



Trabajo a futuro

El presente estudio abre la posibilidad de profundizar en el análisis empírico de cada una de las dimensiones propuestas, particularmente en la evaluación de su interacción en contextos productivos específicos. En este sentido, se plantea como línea de trabajo el desarrollo de estudios comparativos entre territorios dentro de la misma Cuenca Baja del Papaloapan, Veracruz, que permitan identificar variaciones en la articulación entre gobernanza territorial, modelo productivo y racionalidad práctica.

Asimismo, se prevé ampliar el análisis a otros programas como Cosechando Soberanía y Leche para el Bienestar, incorporando las cadenas de maíz y ganadería de doble propósito en el municipio de Tierra Blanca, Veracruz, con el fin de contrastar dinámicas productivas y territoriales en sectores de alta relevancia regional.

Finalmente, resulta pertinente avanzar hacia la generación de evidencia cuantitativa que permita medir el grado de coherencia entre estas dimensiones, así como su impacto en la adopción de prácticas agroecológicas, integrando metodologías complementarias como el análisis de redes y la evaluación económica de sistemas productivos.

Conclusiones

La transición agroecológica en el trópico veracruzano no puede entenderse como un proceso exclusivamente técnico ni como una simple sustitución de insumos. La evidencia empírica muestra que se trata de un fenómeno territorial en el que interactúan de manera simultánea la gobernanza institucional, la estructura del sistema productivo y las decisiones situadas de los productores. En este sentido, la persistencia del uso de herbicidas y la limitada articulación entre programas reflejan que los incentivos actuales no están orientados hacia una transición integral.

El modelo analítico propuesto, basado en las dimensiones de gobernanza territorial, modelo productivo y racionalidad práctica, permite integrar distintos niveles de análisis y superar enfoques fragmentados. Los resultados indican que la transición agroecológica ocurre cuando existe coherencia entre estas dimensiones; en su ausencia, el sistema tiende a reproducir el modelo convencional. Por tanto, el principal aporte del estudio radica en desplazar el análisis centrado en insumos hacia la comprensión del sistema territorial como condicionante del cambio, aportando un marco interpretativo para el análisis de políticas públicas y estrategias de intervención en contextos rurales.

Referencias

- [1] Vilaboa-Arróniz, J., Aguilar-Ávila, J., & Martínez-González, E. G. (2025). Glyphosate in the media: The battle for public information. *Current Topics in Agronomic Science*, 5, e2504. <https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2025.05.04>.
- [2] Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., & David, C. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), 503–515.
- [3] Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
- [4] Van der Ploeg, J. D. (2008). *The new peasantries: Struggles for autonomy and sustainability in an era of empire and globalization*. Earthscan.
- [5] Long, N. (2001). *Development sociology: Actor perspectives*. Routledge.
- [6] High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition-HLPE. (2019). *Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems*. FAO.



- [7] Mier y Terán Giménez Cacho, M., Giraldo, O. F., Aldasoro Maya, M., Morales, H., Ferguson, B. G., Rosset, P., Khadse, A., & Campos, C. (2018). Bringing agroecology to scale. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(6), 637–665.
- [8] Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2023). Sistema de Información de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (SIIACA). <https://www.gob.mx/conadesuca>
- [9] Gliessman, S. (2018). *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*. CRC Press.
- [10] Tiftonell, P. (2014). Ecological intensification of agriculture. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, 53–61.



Zeolitas naturales como acarreadores de antioxidantes para la mitigación del estrés oxidativo en cultivos agrícolas

J.O. Gomez Castrejon¹, M.J. Perea Flores², C. J. Ramos Torres², J. A. Damas Espinoza¹, H. Martínez Gutierrez^{2*}

¹Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. Av. Wilfrido Massieu 399, Nueva Industrial Vallejo, Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de Mexico, México.

²Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, Instituto Politécnico Nacional. Av. Luis Enrique Erro S/N, Zacatenco, Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México, Mexico.

* humartinez@ipn.mx

Artículo: científico

Resumen—El estrés oxidativo aparece cuando las Especies Reactivas de Oxígeno (ROS) superan la capacidad antioxidante de la planta, lo que directamente afecta su crecimiento y rendimiento. En este contexto, las zeolitas llaman la atención para su aprovechamiento agrícola por su porosidad, Capacidad de Intercambio Catiónico y estabilidad. Estas propiedades promueven la retención de agua, nutrientes y pueden servir como acarreadores de antioxidantes. Esta investigación se centra en la caracterización de una zeolita natural y la elaboración de emulsiones de antioxidantes, como parte de una estrategia experimental para contrarrestar el estrés oxidativo en cultivos. Se encontró Clinoptilolita como fase predominante en la zeolita (mediante DRX), un área superficial de 13.8 m². Las emulsiones tuvieron tamaños de 87–99 nm, Pdl bajo y potencial Z cercano a –30 mV, manteniendo estabilidad coloidal durante 72 h. Estos resultados demuestran el potencial de las zeolitas como acarreadores de antioxidantes y permiten su integración a estrategias sostenibles frente al estrés oxidativo en cultivos agrícolas generado por metales pesados.

Introducción

El estrés oxidativo es una respuesta común de las plantas frente a condiciones adversas como sequía, salinidad, temperaturas extremas, toxicidad por metales o deficiencias nutricionales. Esto ocurre cuando la producción de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS) supera la capacidad de defensa antioxidante del organismo vegetal [7]. Este desequilibrio daña membranas, proteínas, pigmentos fotosintéticos y ácidos nucleicos, con efectos negativos directos sobre el crecimiento y el rendimiento agrícola [3].

En este contexto, la búsqueda de materiales capaces de proteger y liberar de forma controlada compuestos bioactivos han llevado a considerar a las zeolitas como un material prometedor. Las zeolitas poseen capacidad de intercambio catiónico, porosidad y estabilidad para participar en sistemas de liberación controlada en la agricultura [4]. De acuerdo con [5], la zeolitas naturales y sintéticas como acondicionadores [MP3.1][JG3.2] de suelo, señala que su utilidad no solo se limita al suministro de nutrientes, sino que también se relaciona con una mayor resiliencia del cultivo frente al estrés abiótico.

Zeolitas: definición y tipos

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos formados por tetraedros de silicio y aluminio enlazados por oxígeno, se organizan en una red tridimensional con cavidades y canales de tamaño molecular [4]. La sustitución parcial de silicio por aluminio genera cargas negativas en la estructura, las cuales se compensan con cationes intercambiables como sodio, potasio, calcio o magnesio; esta característica es la base de su capacidad de intercambio catiónico y de su utilidad agronómica [5]. Desde el punto de vista funcional, una zeolita actúa como un material poroso capaz de retener agua, adsorber moléculas y regular la disponibilidad de iones en el suelo. Por ello, se ha usado para

mejorar la eficiencia de fertilizantes, disminuir pérdidas por lixiviación y modular la disponibilidad de nutrientes en la rizosfera [4]. Estas mismas propiedades permiten pensar en las zeolitas como acarreadores de antioxidantes, ya que una molécula bioactiva adsorbida en su superficie o atrapada en sus poros puede liberarse de manera gradual, bajo determinadas condiciones del medio [6]. Las zeolitas pueden clasificarse en naturales y sintéticas: las zeolitas naturales son las más relevantes para aplicaciones agrícolas, ya que, revisiones recientes sobre suelos agrícolas la mencionan de manera recurrente como una de las opciones más viables para mejorar retención de agua, nutrientes y resiliencia del cultivo [5]., tal como la clinoptilolita, debido a su abundancia, su relativa estabilidad y su elevada afinidad por cationes de interés agronómico, especialmente amonio y potasio [4].

Las zeolitas sintéticas, en cambio, ofrecen la ventaja de un control más preciso sobre la estructura, la relación Si/Al, el tamaño de poro y la química superficial. Esto es importante cuando se pretende diseñar sistemas de adsorción y liberación más específicos, por ejemplo, para transportar moléculas bioactivas con cierto tamaño o polaridad [5]. En los últimos años también ha aumentado el interés por las zeolitas de tamaño nanométrico, debido a que su menor tamaño de partícula incrementa el área superficial disponible, y puede favorecer interacciones más eficientes con compuestos orgánicos y tejidos vegetales [7].

Zeolitas como acarreadores de antioxidantes

El interés en usar zeolitas como acarreadores de antioxidantes deriva de tres funciones complementarias. Primero, el material puede mejorar el entorno radical de la planta mediante retención de agua y nutrientes, reduciendo una fuente importante de generación de especies reactivas de oxígeno [5]. Segundo, la matriz de la zeolita puede adsorber o encapsular compuestos bioactivos, protegiéndolos frente a degradación prematura y favoreciendo su liberación gradual [6]. Tercero, algunos estudios experimentales han mostrado que la aplicación de zeolita, sola o en combinación con compuestos fenólicos, se asocia con menor peroxidación lipídica y mejor actividad antioxidante en cultivos [11]. En este contexto, aunque los trabajos recientes reportan con mayor frecuencia el uso de fitohormonas que antioxidantes, ambos enfoques mantienen una relación directa: una matriz porosa estabiliza un compuesto bioactivo y regula su entrega al sistema [6]. Por ello, la evidencia disponible permite considerar a las zeolitas como una plataforma adaptable para transportar polifenoles, extractos antioxidantes o moléculas señalizadoras con efecto protector frente al estrés oxidativo [5].

Para seleccionar una zeolita con potencial como acarreador en cultivos agrícolas, no basta con saber que es porosa; es indispensable caracterizar varias propiedades que determinan su desempeño real:

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico es una de las propiedades más importantes, ya que indica la cantidad de cationes que puede retener e intercambiar la zeolita en su estructura. En agricultura, esta característica se relaciona con la retención de amonio, potasio y calcio, y ayuda a disminuir pérdidas de nutrientes por lixiviación [3]. Una zeolita con buena capacidad de intercambio también puede facilitar la interacción con compuestos bioactivos cargados o con formulaciones complejas, lo que la vuelve más útil como matriz de liberación controlada. Se ha reportado un nanocompuesto zeolita-biocarbon encapsulado con ácido salicílico con una capacidad de intercambio catiónico de $148.7 \pm 6.3 \text{ cmol kg}^{-1}$, valor que respalda su aptitud para aplicaciones agrícolas funcionales. Aunque ese estudio se centró en ácido salicílico, el dato es útil porque muestra el orden de magnitud



deseable cuando se buscan materiales con comportamiento dual: soporte de compuestos bioactivos y mejorador del suelo [6].

Área Superficial Específica

El área superficial específica, estimada normalmente mediante el método BET, indica cuánta superficie tiene disponible el material para adsorber moléculas. En zeolitas y materiales híbridos, esta propiedad adquiere especial importancia porque el tamaño reducido de partícula aumenta los sitios accesibles y puede modificar la cinética de liberación [6]. En términos prácticos, una mayor área superficial suele traducirse en mayor capacidad de carga para compuestos antioxidantes y en una interacción más intensa entre el material y la solución del suelo [7].

Para uso agrícola, conviene seleccionar zeolitas con superficie específica suficiente (valores $>10 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) para adsorber la molécula objetivo sin comprometer la estabilidad del material. Si el área es demasiado baja, la carga de antioxidante será limitada; si la formulación es inestable, la liberación puede ser demasiado rápida y perder efectividad antes de que el cultivo la aproveche [5].

Cristalinidad

La difracción de rayos X (DRX) permite identificar la fase cristalina de la zeolita y verificar si su estructura se conserva después de tratamientos térmicos, químicos o de encapsulación. Esta prueba es esencial porque la funcionalidad del material depende de que la red cristalina mantenga sus canales y cavidades [4]. En otras palabras, no basta con que una muestra sea “mineral”; es necesario confirmar que corresponde a la zeolita deseada y que conserva su cristalinidad después del procesamiento, ya que la estructura cristalina está directamente relacionada con las propiedades funcionales como CIC, la adsorción y la estabilidad [5].

Para aplicaciones agrícolas, una zeolita analizada a través de DRX debe mostrar una fase dominante clara, buena estabilidad estructural y ausencia de transformaciones severas tras su modificación. Esto es particularmente importante cuando se incorporan compuestos orgánicos, o cuando el material se expone a agua, soluciones nutritivas o variaciones de pH [4,5].

Relación Si/Al, porosidad y tamaño de poro.

La relación silicio/aluminio influye en la carga de la red, la hidrofiliidad y la estabilidad química de la zeolita. Una relación adecuada (2.5 – 5.0 en zeolitas naturales) permite equilibrar capacidad de intercambio, afinidad por agua y estabilidad estructural, todos estos son factores relevantes cuando la matriz debe retener, y liberar moléculas activas en el ambiente agrícola [5]. Además, el tamaño y la distribución de poro determinan si una molécula antioxidante podrá alojarse en el material, o solo adsorberse en la superficie externa [6]. Si el poro es demasiado pequeño, el ingreso de ciertas moléculas fenólicas será limitado; si es demasiado grande, la liberación puede ser muy rápida. Por eso, la selección debe hacerse en función del compuesto antioxidante concreto y del modo de aplicación previsto, ya sea al suelo, por fertirriego o en recubrimiento de semillas [5].

Estabilidad y pureza

Una zeolita para uso en cultivos agrícolas debe ser químicamente estable y presentar baja carga de impurezas tóxicas. Esto incluye verificar que el material no aporte metales pesados en concentraciones tóxicas o por arriba de los límites máximos permisibles señalados en normativas

internacionales, y que no genere efectos negativos sobre la microbiota del suelo o la fisiología del cultivo [5]. Además, su granulometría, compatibilidad con el sistema de riego y facilidad de aplicación son factores prácticos de selección, sobre todo en esquemas de agricultura intensiva o protegida [1].

Condiciones deseables de antioxidante para uso agrícola

Los antioxidantes que se pretendan utilizar en la agricultura deben ser estables frente a la luz y la temperatura, solubles para facilitar su absorción y no deben de representar un peligro para el ambiente. La principal función que cumplirán será reducir las ROS y promover la mitigación del estrés oxidativo. Sumado a lo anterior, es deseable que sean compatibles con acarreadores o nanopartículas, que esto favorece la liberación controlada y su eficacia en campo. En el caso de compuestos sensibles (como β -carotenos), la encapsulación es fundamental para protegerlos de la degradación por luz y oxígeno, además de que aumenta su solubilidad y facilita su absorción en las plantas, asegurando la capacidad antioxidante en condiciones de estrés [2].

También debe demostrar comportamiento agronómico favorable. Esto significa que su aplicación no solo debe ser segura, sino además contribuir a mejorar variables fisiológicas asociadas con la tolerancia al estrés, como mayor contenido relativo de agua, mejor fotosíntesis, menor fuga de electrolitos y menor malondialdehído en tejido vegetal [10].

Evidencia experimental

Para sustentar la propuesta de uso de zeolitas como acarreadores de antioxidantes, se desarrolló un estudio experimental con una zeolita natural tipo clinoptilolita y nanoemulsiones antioxidantes. La zeolita, de origen comercial, fue lavada con agua desionizada y secada a 100 °C para eliminar impurezas. Su caracterización por Difracción de Rayos X (DRX) confirmó la fase dominante clinoptilolita, con un área superficial de 13.8 m²/g y morfología laminar observada por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) (Figura 1). Estas propiedades macro-mesoporosas son favorables para la adsorción de compuestos bioactivos [8].

Las emulsiones se formularon con aceite MCT y un compuesto antioxidante, empleando goma arábica y surfactantes Tween 80/Tween 20 (60:40). Tras homogenización y sonicación (130 W, 20 kHz, 20 % de amplitud, 15 min), se obtuvieron tamaños promedio entre 87 y 99 nm, con índice de polidispersidad bajo y potencial Z cercano a -30 mV, lo que indica estabilidad coloidal durante 72 h. La combinación de clinoptilolita y emulsiones antioxidantes podrían mostrar un potencial para reducir la biodisponibilidad del cadmio y fortalecer la respuesta antioxidante en cultivos de lechuga (*Lactuca sativa*) [10].

La evidencia experimental confirma que la clinoptilolita puede actuar como matriz adsorbente para nanoemulsiones antioxidantes, ofreciendo una alternativa sostenible para mitigar el estrés oxidativo inducido por metales pesados. En la Figura 1 se presentan el difractograma DRX, la imagen SEM y los parámetros de tamaño y estabilidad de las emulsiones, que respaldan la viabilidad del sistema propuesto para su evaluación en condiciones de invernadero.

En la Figura 1A se presenta el difractograma de la muestra de zeolita, mostrando picos característicos de la fase cristalina clinoptilolita (carta cristalográfica 98-008-7847). El área superficial que se obtuvo por el método BET fue de $13.838 \text{ m}^2/\text{g}$, con una mayor abundancia de macro y mesoporos, lo cual se confirmó a través de la observación por SEM (Figura 1B); estas características típicas de clinoptilolita son de gran relevancia, ya que permitirán depositar en el acarreador el compuesto antioxidante. Las emulsiones presentaron tamaños de partícula promedio entre 87 - 99 nm para 0 h y 72 h, respectivamente. El PDI y el potencial Z cercano a -30 mV indican una estabilidad moderada (Fig. 1 C).

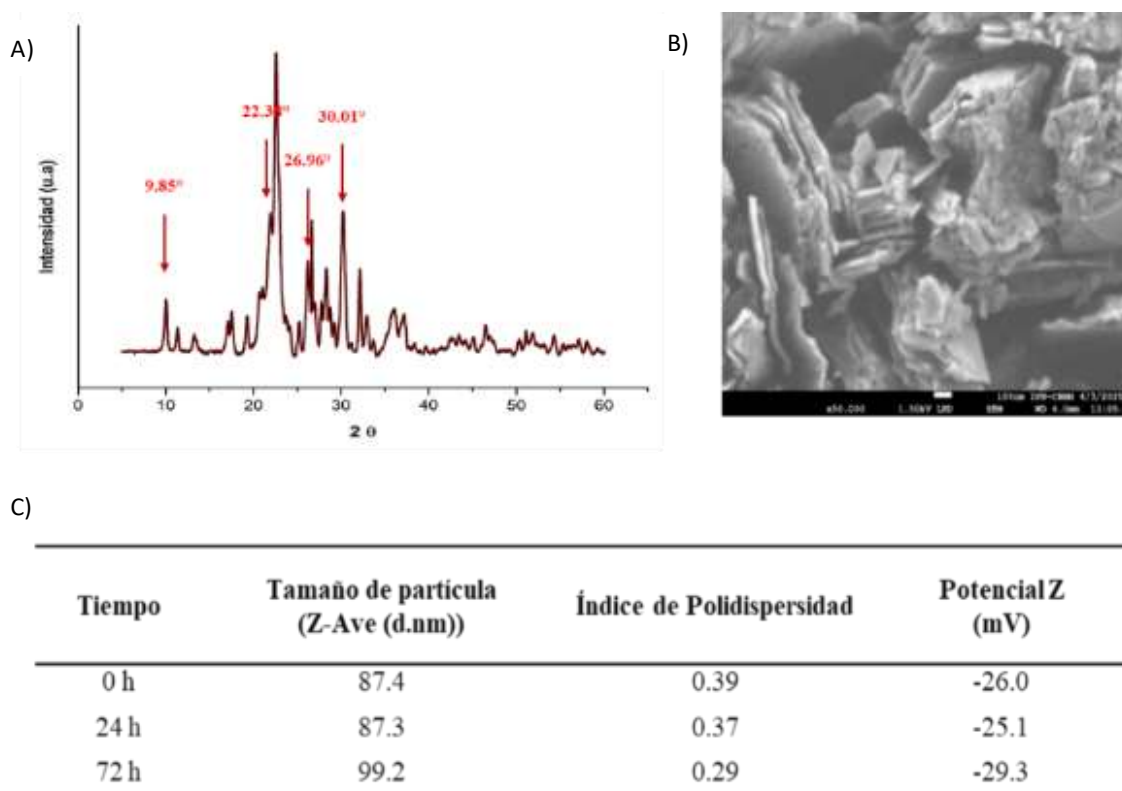


Figura 1. A) Difractograma DRX de la muestra de zeolita; B) Imagen de SEM de la zeolita; C) Parámetros de tamaño y estabilidad de las emulsiones.

Discusión

La evidencia reciente sugiere que las zeolitas pueden contribuir a reducir el estrés oxidativo en cultivos por dos vías. La primera es indirecta: al mejorar disponibilidad hídrica y nutricional, disminuyen el nivel de estrés abiótico que desencadena la sobreproducción de ROS [5]. La segunda es más innovadora: al servir como acarreadores de antioxidantes, pueden transformar una aplicación puntual en una liberación gradual y más eficiente en el entorno del cultivo (Figura 2) [6].

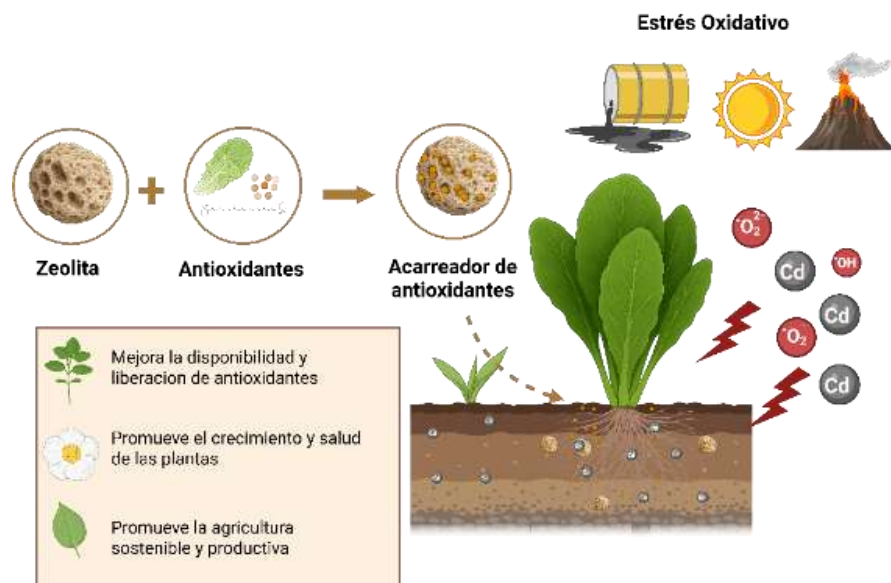


Figura 2. Estrategia experimental para la mitigación del estrés oxidativo en cultivos agrícolas con zeolitas naturales como acarreadores de antioxidantes.

Sin embargo, a pesar de los avances reportados, siguen siendo escasos los estudios que evalúan de forma directa el uso de zeolitas con antioxidantes en cultivos agrícolas. La evidencia respalda el papel de las zeolitas como enmiendas de suelo y como matrices de liberación para compuestos activos; no obstante, no existe evidencia sólida para sistemas basados en antioxidantes encapsulados y su aplicación en cultivos agrícolas [4,5]. En este sentido, la relevancia actual de esta línea de investigación radica en su potencial tecnológico y en su carácter interdisciplinario, ya que integra principios de ciencia de materiales, fisiología vegetal y agricultura sostenible [5,6].

Conclusiones

Las zeolitas representan una plataforma con alto potencial para mitigar el estrés oxidativo en cultivos, debido a sus propiedades fisicoquímicas que permiten mejorar el suelo y actuar como acarreadores de antioxidantes. Sin embargo, aunque existen fundamentos sólidos y resultados prometedores, la evidencia en cultivos agrícolas reales aún es limitada, especialmente para sistemas con antioxidantes encapsulados. Por ello, se requiere fortalecer la investigación integrando la caracterización del material con su desempeño agronómico, a fin de consolidar su aplicación como una estrategia eficiente y sostenible frente al estrés abiótico.

Agradecimientos

Este trabajo contó con el apoyo de los proyectos SIP 20250683, 20253508, 20260087 y 20260807 del IPN y de la SECIHTI, mediante beca nacional de posgrado.



Referencias

- [1] Conversa, G., Pacifico, S., La Rotonda, P., Lazzizzera, C., Bonasia, A., & Elia, A. (2024). Foliar application of natural zeolites affects the growth and productivity of processing tomato. *European Journal of Agronomy: The Journal of the European Society for Agronomy*, 154(127100), 127100. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127100>
- [2] da Silva, M. M., Paese, K., Guterres, S. S., Pohlmann, A. R., Rutz, J. K., Flores Cantillano, R. F., Nora, L., & Rios, A. de O. (2017). Thermal and ultraviolet–visible light stability kinetics of co-nanoencapsulated carotenoids. *Food and Bioproducts Processing*, 105, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.05.004>
- [3] García-Pérez, P., Losada-Barreiro, S., Bravo-Díaz, C., Gallego, P. P., & Lucini, L. (2025). Plant oxidative stress and specialized metabolites: a holistic physicochemical and metabolomics perspective. *Plant Physiology and Biochemistry*, 227(110093), 110093. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110093>
- [4] Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K., & Mierzwa-Hersztek, M. (2022). The use of zeolites as an addition to fertilisers – A review. *Catena*, 213(106125), 106125. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106125>
- [5] Javaid, A., Munir, N., Abideen, Z., Siddiqui, Z. S., & Yong, J. W. H. (2024). The role of natural and synthetic zeolites as soil amendments for mitigating the negative impacts of abiotic stresses to improve agricultural resilience. *Plant Stress*, 14(100627), 100627. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100627>
- [6] Mahgoub, S. M., Alawam, A. S., Allam, A. A., M M, M. M., Mokhtar, A. M., Radalla, A. M., & Mahmoud, R. (2025). Development of a salicylic acid-encapsulated zeolite-seaweed biochar composite for sustainable agricultural applications. *RSC Advances*, 15(54), 46570–46590. <https://doi.org/10.1039/d5ra06953j>
- [7] Mahmoud, A. W. M., Rashad, H. M., Esmail, S. E. A., Alsamadany, H., & Abdeldaym, E. A. (2023). Application of silicon, zinc, and zeolite nanoparticles-A tool to enhance drought stress tolerance in coriander plants for better growth performance and productivity. *Plants*, 12(15), 2838. <https://doi.org/10.3390/plants12152838>
- [8] Ribeiro, A. C., de Oliveira, A. M., Beltran, L. B., Diório, A., Magalhães-Ghiotto, G. A. V., de Abreu Filho, B. A., de Almeida Duarte, E. da C. N. F., & Bergamasco, R. (2024). Antibacterial activity of functionalized natural zeolites (NZ-AgNPs) and its application in bacteriological water treatment and commercial paints. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*, 22(101001), 101001. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.101001>
- [9] Sedaghat, M., Hazrati, S., & Omrani, M. (2022). Use of zeolite and salicylic acid as an adaptation strategy against drought in wheat plants. *Suid-Afrikaanse Tydskrif Vir Plantkunde [South African Journal of Botany]*, 146, 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.10.001>
- [10] Villalobos-Castillejos, F., Granillo-Guerrero, V. G., Leyva-Daniel, D. E., Alamilla-Beltrán, L., Gutiérrez-López, G. F., Monroy-Villagrana, A., & Jafari, S. M. (2018). Fabrication of nanoemulsions by microfluidization. En *Nanoemulsions* (pp. 207–232). Elsevier.
- [11] Zeinalipour, N., & Saadati, S. (2024). Physiological and biochemical response of strawberry cv. diamond to nano zeolite soil application and cinnamic acid foliar application. *Scientific Reports*, 14(1), 28908. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76419-5>



Evaluación de prácticas agrícolas del *chayote (sechium edule(jacq.) sw.)* en las altas montañas de Veracruz

Martha Romero Jaén^a, Susana Isabel Castillo Martínez^{b, f}, Rogelio Limón Rivera^c, Emmanuel de Jesús Ramírez Rivera^d, Rosalia Nuñez Pastrana^e

^{a,b,c,d} Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Maestría en ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico

^e Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

^f Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba – División de Estudios de Posgrado e Investigación

Maestría en ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico, Instituto Tecnológico Superior de Zongolica
susana_castillo@zongolica.tecnm.mx

Artículo: científico

Resumen— El cultivo de chayote (*Sechium edule*) en la región de las Altas Montañas de Veracruz enfrenta retos derivados del cambio climático y el rezago en la innovación agronómica. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar las prácticas agrícolas y el nivel de adopción tecnológica de los productores en los municipios de Ixtaczoquitlán y Coscomatepec. Se desarrolló un estudio con enfoque cuantitativo, descriptivo y transversal, aplicando un instrumento estructurado a una muestra representativa de 199 productores (con una potencia estadística >0.80). Los resultados indican que el perfil del productor es predominantemente masculino (92%) y de edad madura, con un rezago educativo significativo. Agronómicamente, se evidenció una profunda brecha tecnológica: el 95.6% depende de sistemas de riego ineficientes por inundación y el 55.6% emplea un manejo de fertilización mixto. Asimismo, el 100% de los encuestados percibe afectaciones directas por el cambio climático, destacando el estrés hídrico y la proliferación de plagas. A pesar de este escenario de alta vulnerabilidad, existe una disposición favorable hacia el cambio. Se concluye que la falta de infraestructura y conocimiento técnico limita la innovación, por lo que la implementación de estrategias basadas en la mercadotecnia social y la transferencia tecnológica es fundamental para transitar hacia una agricultura resiliente y alineada con la Agenda 2030.

Palabras clave: *Sechium edule*, mercadotecnia social, adopción tecnológica, cambio climático, brecha agronómica, sustentabilidad.

Abstract

The cultivation of chayote (*Sechium edule*) in the High Mountains region of Veracruz faces critical challenges derived from climate change and the lag in agronomic innovation. This research aimed to evaluate the agricultural practices and the level of technological adoption of producers in the municipalities of Ixtaczoquitlán and Coscomatepec. A quantitative, descriptive, and cross-sectional study was developed, applying a structured instrument to a representative sample of 199 producers (with a statistical power >0.80). The results indicate that the producer profile is predominantly male (92%) and of mature age, with a significant educational lag. Agronomically, a deep technological gap was evidenced: 95.6% depend on inefficient flood irrigation systems and 55.6% use mixed fertilization management. Furthermore, 100% of the respondents perceive direct impacts from climate change, highlighting water stress and pest proliferation. Despite this highly vulnerable scenario, there is a favorable disposition towards change. It is concluded that the lack of infrastructure and technical knowledge limits innovation; therefore, the implementation of strategies based on social marketing and technology transfer is essential to transition towards resilient agriculture aligned with the 2030 Agenda.

Keywords: *Sechium edule*, social marketing, technological adoption, climate change, agronomic gap, sustainability.

Introducción

El chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) es una especie originaria de Mesoamérica que posee una profunda relevancia socioeconómica, alimentaria y cultural en México. El estado de Veracruz destaca como la principal entidad productora a nivel nacional, siendo la región de las Altas Montañas un epicentro histórico para su cultivo [1]. En municipios clave como Coscomatepec e Ixtaczoquitlán, la producción de esta cucurbitácea no solo representa una fuente de ingresos para cientos de familias rurales, sino que también es un elemento articulador de la economía local, generando empleos directos e indirectos a lo largo de su cadena de valor [2].

Dada la importancia estratégica de este sistema producto, los productores de la región operan bajo condiciones de creciente vulnerabilidad. En los últimos años, los efectos del cambio climático han alterado drásticamente las condiciones agroclimáticas tradicionales. Variaciones extremas en la temperatura, sequías prolongadas y la alteración en los patrones de precipitación han provocado un estrés hídrico severo en las parcelas, facilitando además la proliferación de plagas y enfermedades atípicas, como la araña roja y el gusano barrenador [3]. Estas condiciones amenazan directamente el rendimiento de los huertos y la rentabilidad económica de los productores, poniéndolos en riesgo de abandono de tierras.

A esta problemática ambiental se suma un marcado rezago en la adopción de herramientas y prácticas de innovación tecnológica. Históricamente, el manejo agronómico del chayote en la región se ha basado en un enfoque tradicional, caracterizado por una alta dependencia de insumos agroquímicos convencionales y sistemas de riego ineficientes, como la inundación por gravedad [4]. Este modelo productivo, además de generar un impacto ambiental negativo por la degradación de los suelos, limita la competitividad de los productores en mercados más exigentes que demandan trazabilidad y sostenibilidad [5].

En este contexto, la integración de la mercadotecnia social y la transferencia tecnológica emergen como estrategias fundamentales para catalizar la transición hacia una agricultura resiliente. La mercadotecnia social ofrece un marco teórico robusto para promover la adopción voluntaria de prácticas sostenibles entre los productores [6]. Facilitar el acceso a tecnologías de agricultura de precisión, sistemas de riego tecnificado y métodos de control biológico no solo optimiza el uso de recursos, sino que se alinea directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 [7].

Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es evaluar las prácticas agrícolas y el nivel de adopción de innovaciones tecnológicas por parte de los productores de chayote en los municipios de Ixtaczoquitlán y Coscomatepec, Veracruz. Este diagnóstico permitirá identificar las brechas existentes entre las prácticas convencionales y las sostenibles, proporcionando información clave para el futuro diseño de estrategias de intervención.

Metodología

Área de estudio y diseño de investigación

El estudio se realizó en los municipios de Ixtaczoquitlán y Coscomatepec, ubicados en la región de las Altas Montañas del estado de Veracruz, México. Esta zona representa una de las franjas de mayor producción de chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) a nivel nacional debido a sus condiciones orográficas y climáticas [2]. La investigación se rigió bajo un enfoque cuantitativo, de alcance descriptivo y con un diseño no experimental de corte transversal [8].

Población y determinación de la muestra

Dada la ausencia de un censo oficial actualizado que delimite el universo total de productores en las comunidades específicas de estudio, se aplicó el criterio para poblaciones infinitas o de tamaño desconocido. Se utilizó la fórmula de Cochran considerando un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%.

Si bien el cálculo teórico inicial sugería una muestra superior, las limitaciones logísticas del trabajo de campo derivaron en una muestra final de 199 productores encuestados de manera presencial. Para validar la representatividad de este grupo, se realizó un análisis de poder estadístico basado en los criterios de Cohen (1988), determinando que una $n=199$ proporciona una potencia estadística suficiente (superior al 0.80) para detectar efectos significativos y realizar inferencias descriptivas confiables sobre las prácticas agronómicas de la región [9].

Instrumento de recolección de datos

Para el levantamiento de la información en campo se utilizó una adaptación estructurada de la "Encuesta Diagnóstico para productores de Chayote", de la cual se extrajeron y seleccionaron de manera específica las secciones alineadas con los objetivos de la presente investigación. De la estructura general del instrumento, se utilizaron cuatro dimensiones fundamentales para el análisis: 1) Identificación del productor (variables sociodemográficas y situación de la tenencia de la tierra). 2) Prácticas agrícolas y tecnológicas (evaluación de los sistemas de riego, manejo de la fertilización y control de plagas) [6]. 3) Percepción del cambio climático y sus efectos directos en la unidad productiva [3]. 4) Comercialización, diferenciación y nivel de adopción tecnológica (disposición hacia la innovación y apertura a estrategias fundamentadas en la mercadotecnia social) [4].

El cuestionario fue aplicado mediante entrevistas directas a los productores, asegurando la correcta interpretación de los reactivos y la confiabilidad de los datos recolectados.

Análisis estadístico

Los datos recolectados fueron tabulados y procesados mediante estadística descriptiva. Se emplearon distribuciones de frecuencias y porcentajes para identificar las tendencias dominantes en el comportamiento del productor. El procesamiento de la información se realizó mediante el software Microsoft Excel, facilitando la identificación de las brechas tecnológicas existentes frente a los modelos de sostenibilidad propuestos por la Agenda 2030 [7].

Resultados y discusión

Perfil sociodemográfico de los productores

Los resultados demuestran que la producción de chayote en Ixtaczoquitlán y Coscomatepec está liderada predominantemente por hombres (92%), con una edad promedio que oscila entre los 45 y 60 años. En cuanto al nivel educativo, el 65% de los encuestados cuenta únicamente con educación primaria básica. Esta estructura demográfica coincide con lo reportado por Romero [2], quien señala que el relevo generacional en las Altas Montañas es limitado, lo que representa un desafío crítico para la transferencia tecnológica y la adopción de innovaciones basadas en la digitalización [10].

Manejo agronómico y brechas tecnológicas

Un hallazgo fundamental, es la alta dependencia del riego. El 95.6% de los productores cuenta con sistemas de riego, predominando el método de inundación. Sin embargo, a pesar de contar con este recurso, se observa una baja eficiencia en el uso del agua y una nula tecnificación automatizada. En cuanto a la nutrición del cultivo, el 55.6% emplea una combinación de fertilización orgánica y química.

Percepción del cambio climático

El 100% de los productores percibe efectos directos del cambio climático en sus huertos. Los principales impactos identificados son la alteración de los periodos de floración y el incremento agresivo de plagas.

La discusión de estos resultados sugiere que el estrés hídrico y térmico está rompiendo el equilibrio biológico, obligando al productor a incrementar las aplicaciones químicas. Esto concuerda con Hernández Aguilar *et al.* [3], quienes advierten que, sin una estrategia de adaptación climática, la viabilidad económica del chayote en Veracruz podría verse comprometida para el año 2030 [11].

Mercadotecnia social y disposición a la innovación

La aplicación de estrategias de mercadotecnia social, como proponen Salado Carmona *et al.* [4], no solo busca mejorar el precio de venta, sino transformar el comportamiento del productor hacia prácticas más resilientes. La disposición observada indica que el productor no es resistente al cambio por falta de voluntad, sino por falta de infraestructura y conocimiento técnico compartido [6], [7].

Conclusiones

El diagnóstico realizado a los 199 productores de chayote en los municipios de Ixtaczoquitlán y Coscomatepec evidencia la existencia de una profunda brecha tecnológica en el manejo agronómico de la región. A pesar de la enorme relevancia socioeconómica de este sistema producto para las Altas Montañas, las prácticas de cultivo permanecen ancladas a métodos convencionales, caracterizados por una alta dependencia del riego por inundación y esquemas de fertilización y control fitosanitario predominantemente empíricos y químicos. Estas condiciones, sumadas a la falta de asistencia técnica especializada, limitan severamente la competitividad y la sostenibilidad de las unidades de producción.

Asimismo, la investigación confirma un escenario de alta vulnerabilidad ambiental. Los productores son plenamente conscientes de los efectos del cambio climático, los cuales ya están mermando sus rendimientos a través del estrés hídrico y la proliferación de plagas atípicas como la araña roja y diversos hongos. Queda demostrado que el modelo productivo actual ha alcanzado su límite operativo y requiere una transformación urgente.

Se concluye que la mercadotecnia social y la transferencia tecnológica son herramientas altamente viables para esta región. Las futuras intervenciones no deben limitarse a la simple entrega de insumos, sino que deben enfocarse en la capacitación técnica, el diseño de marcas colectivas y la tecnificación del riego. Solo a través de una integración colaborativa entre productores e instituciones será posible garantizar la resiliencia económica y ecológica del cultivo del chayote frente a los retos de la Agenda 2030.



Referencias

- [1] C. H. Avendaño Arrazate, J. Cadena Iñiguez, et al., Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización. México: Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México (GISEM), 2010.
- [2] L. A. Barrera-Guzmán, et al., "Distribución potencial de *Sechium edule* (Cucurbitaceae) domesticado en México," *Acta Biológica Colombiana*, vol. 27, no. 3, pp. 326-335, 2021.
- [3] C. G. Hernández Aguilar, et al., "El Cambio Climático y su Efecto en Cultivos Agrícolas de México," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 9, no. 6, pp. 10275-10293, 2025. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.22157
- [4] E. Zúñiga y V. Magaña, "Vulnerabilidad y riesgo por lluvias intensas en México: el efecto del cambio en la cobertura del uso del suelo," *Investigaciones Geográficas*, no. 95, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.59465>
- [5] P. M. Panchal y B. K. Singh, "Effect of Physical and Chemical Extraction Methods on Yield of Chayote (*Sechium edule*) Tuber Starch," *Journal of Scientific Research and Reports*, vol. 30, no. 12, pp. 938-943, 2024. DOI: <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i122736>
- [6] M. L. Salado Carmona, et al., "La Mercadotecnia Social en el Programa Sembrando Vida: Revisión de Literatura," *Ibero Ciencias Revista Científica y Académica*, vol. 4, no. 3, 2025. DOI: <https://doi.org/10.63371/ic.v4.n3.a337>
- [7] A. G. Martín Díaz, Y. T. Vichi Martínez, y V. G. Aguilera Cervantes, "Marketing social y educación para la promoción de conductas alimentarias sostenibles," en *Construyendo caminos sostenibles a partir de la mercadotecnia, el emprendimiento social y la agroecología*, A. L. Bojórquez Carrillo, et al., Coords. México: Comunicación Científica, 2024, pp. 165-182. DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.342.09>
- [8] Ramos-Galarza, C. A. (2020). Los alcances de una investigación. *CienciAmérica*, 9(3). <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>
- [9] Ofori, E. (2025). Determination of Sample Size for data collection: A Comprehensive Guide. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/388896042_Determination_of_Sample_Size_for_data_collection
- [10] Blanco-Capia, L. E. (2021). La cadena de valor de hortalizas: consideraciones para el desarrollo local a partir del productor. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 9(1), 41-52. http://www.scielo.org/bo/scielo.php?pid=S2308-38592021000100041&script=sci_abstract
- [11] Ixmatlahua-Rodríguez, C. A., Murguía-González, J., Leyva-Ovalle, O. R., y Galindo-Tovar, M. E. (2022). *Identification of diseases caused by fungi in the fruit of chayote [Sechium edule (Jacq.) Sw.] in the Municipality of Ixtaczoquitlán, Ver.* [Tesis de Maestría, Tecnológico Nacional de México]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/395793593_Identification_of_diseases_caused_by_fungi_in_the_fruit_of_chayote_Sechium_edule_Jacq_Sw_in_the_Municipality_of_Ixtaczoquitlan_Ver



Aclimatación de orquídeas del género *Dendrobium nobile* “spring dream” con Glicina y Cisteína como biestimulantes

J. M. Nuñez Pineda^{1*}, L. A. Solano Rodríguez¹, R. Ameca Humilde², G.L Cuatra Xicalhua², P. A. Mendoza del Angel^{2*}

¹Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Prol. Oriente 6 1009, Rafael Alvarado, C.P. 94340, Orizaba., Veracruz

²Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana, Carretera Peñuelas Amatlán Kilómetro 117, C.P. 94500, Córdoba, Veracruz

*pabmendoza@uv.mx

Artículo: científico

Resumen

Dentro de las plantas ornamentales se encuentran las orquídeas. Donde destaca el género *Dendrobium spp.* por sus características visuales de abundante floración y sus colores. En esta investigación se evaluó el uso de aminoácidos para el proceso de aclimatación de estas plantas provenientes de cultivo *in vitro*. Para esto se utilizaron dos aminoácidos los cuales fueron glicina y cisteína en una sola concentración (1 mg/L⁻¹). Se realizaron aplicaciones vía foliar cada dos días durante un mes. Posteriormente se evaluó altura de la planta, longitud radicular y porcentaje de supervivencia. Los resultados demuestran que el uso de cisteína y glicina combinados en la concentración de 1 mg/L⁻¹ aportan un mayor crecimiento de las estructuras vegetativas, así como aumenta el porcentaje de supervivencia. Por lo tanto, el uso y aplicación de estos dos aminoácidos en etapas tempranas benefician el desarrollo y aclimatación de plántulas pertenecientes al género *Dendrobium nobile* “spring dream”.

Introducción

El proceso de aclimatación consiste en cambiar alguna planta de condiciones *in vitro* a condiciones *ex vitro*, este proceso debe ser de una manera muy cuidadosa (Lalam et al., 2016). Este periodo de aclimatación puede tener una duración tanto corta como larga, ya sea esta de días, semanas o en algunos casos hasta meses (Indacochea et al., 2017). Durante este proceso se deben seguir medidas específicas con el propósito de evitar anomalías fisiológicas y morfológicas de la planta como es la deficiencia en el funcionamiento del sistema estomático, insuficiencia en el aparato fotosintético, baja eficiencia de absorción y transporte del agua, siendo estos dos últimos los que causan la mayor cantidad de muertes de las plántulas en este tipo de procesos. Otro de los aspectos que se debe tomar en cuenta es la longitud de las raíces de las plantas, ya que esta debe ser adecuada al momento del trasplante a las condiciones *ex vitro*. Asimismo, la aclimatación depende de la eficacia y la calidad final de las plantas que se producen de forma *in vitro*, lo que vuelve este proceso una parte de gran importancia en el proceso de micropropagación (Díaz et al., 2010).

La supervivencia de las plantas que pasan de condiciones *in vitro* a *ex vitro* es dependiente de las peculiaridades fisiológicas, anatómicas y estructurales que las plántulas pudieran desarrollar en el proceso (López et al., 2014), es aquí donde entra el uso de aminoácidos como bioestimulantes en las plantas. Un bioestimulante es un producto orgánico que puede servir como potenciadores al ser aplicados en las plantas, haciendo su función de servir como protectores ante situaciones de estrés abiótico, siendo amortiguadores de los efectos adversos que este provoca en los cultivos (Du Jardin, 2012). La cisteína que ha demostrado ser muy útil en el cultivo *in vitro* de papas (*Solanum tuberosum* L.) protegiéndola de situaciones de estrés (Bordallo et al., 2004). Otro aminoácido utilizado fue la glicina que es el más simple de todos los aminoácidos existentes, este ha mostrado

efectividad en cultivo *in vitro* de soja (Sarawa et al., 2016).

La presente investigación se centró en aclimatar vitro plantas del género *Dendrobium nobile* “*spring dream*” empleando la glicina y cisteína como bioestimulantes para el crecimiento vegetativo y endurecimiento radicular durante su etapa de aclimatización, con el objetivo que la aplicación de estos dos aminoácidos repercuta de manera benéfica en el desarrollo fenológico de las plantas.

Metodología

La presente investigación se realizó en las instalaciones de la empresa Queen bee flower market ubicada en el municipio de Orizaba, Veracruz. Especialmente en el área de aclimatización y endurecimiento radicular de vitro plantas.

Se emplearon 144 vitroplantas del género *D. nobile* “*Spring dream*”. Las cuales se encontraban en frascos de cristal con capacidad de 350 cc, sembradas en medio de cultivo de Murashige & skoog. Las vitroplantas tenían un desarrollo de 9 meses aproximadamente. Se efectuó un lavado radicular a las vitroplantas con uso de agua destilada y un cepillo de cerdas finas, con el propósito de remover el medio de cultivo. Posteriormente, se emplearon charolas de polipropileno de alta densidad con 12 cavidades cada una, con una capacidad de 55 cc. En cada cavidad se sembró una planta de *D. nobile* “*Spring dream*”. Se hizo la aplicación de dos aminoácidos los cuales fueron cisteína y glicina, así como también el tratamiento testigo y un tratamiento más que contenía glicina + cisteína. La dosis única que se empleó para la realización de este experimento fue 1 mg/L. Las aplicaciones se efectuaron dos veces por semana con uso de un aspersor mecánico. Las variables evaluadas fueron altura de planta, longitud radicular y porcentaje de supervivencia.

Análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar. Se evaluaron cuatro tratamientos (testigo, glicina, cisteína y glicina + cisteína), con una dosis única de 1 mg/L⁻¹. Cada tratamiento contó con tres repeticiones y se integraron por 12 vitropántulas, lo que resultó en 12 unidades experimentales y en la evaluación de 144 vitropántulas en total. Los datos obtenidos fueron analizados por un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con prueba de comparación de medias de Tukey con una significancia de $\alpha=0,05$. Los resultados fueron procesados en el software estadístico Rstudio versión 2025 y graficados en el programa Origin pro.

Resultados y discusión

Altura de planta

En lo que respecta la variable de altura de planta (Fig. 1) el análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento de cisteína obtuvo una altura promedio de planta de 51.80 mm ubicando este tratamiento en el grupo estadístico c. Estos resultados los atribuimos a la funcionalidad de la cisteína ya que este aminoácido está orientado a la mejora de funcionamiento de procesos metabólicos y no a la creación de compuestos clorofílicos que aumenten el tamaño de las estructuras vegetativas, esenciales en esta etapa fisiológica de la planta (Romero et al., 2014). Por su parte, el tratamiento de glicina presentó un promedio de altura de 63.97 mm, ubicando a este tratamiento en el grupo estadístico b. Esto lo atribuimos a la capacidad de absorción de este aminoácido por las plantas vía foliar, así como el efecto directo que tiene como osmoprotector que mantiene la viabilidad celular y el aumento de la tasa fotosintética (Xiaochuang

et al., 2017). Asimismo, la aplicación conjunta de estos dos aminoácidos fue la que mayor porcentaje de altura de planta presentó, registrando un promedio de 73.78 mm, lo que ubica a este tratamiento en el grupo estadístico a. La aplicación conjunta de estos aminoácidos repercute en el crecimiento vegetativo de las plantas, por el accionar particular de cada uno de los aminoácidos evaluados, por su parte la glicina al actuar como osmoprotector y precursor del proceso fotosintético; mientras que, la glicina tiene injerencia en rutas antioxidantes y protección celular, factores esenciales durante el proceso de aclimatización y endurecimiento radicular de vitroplántulas.

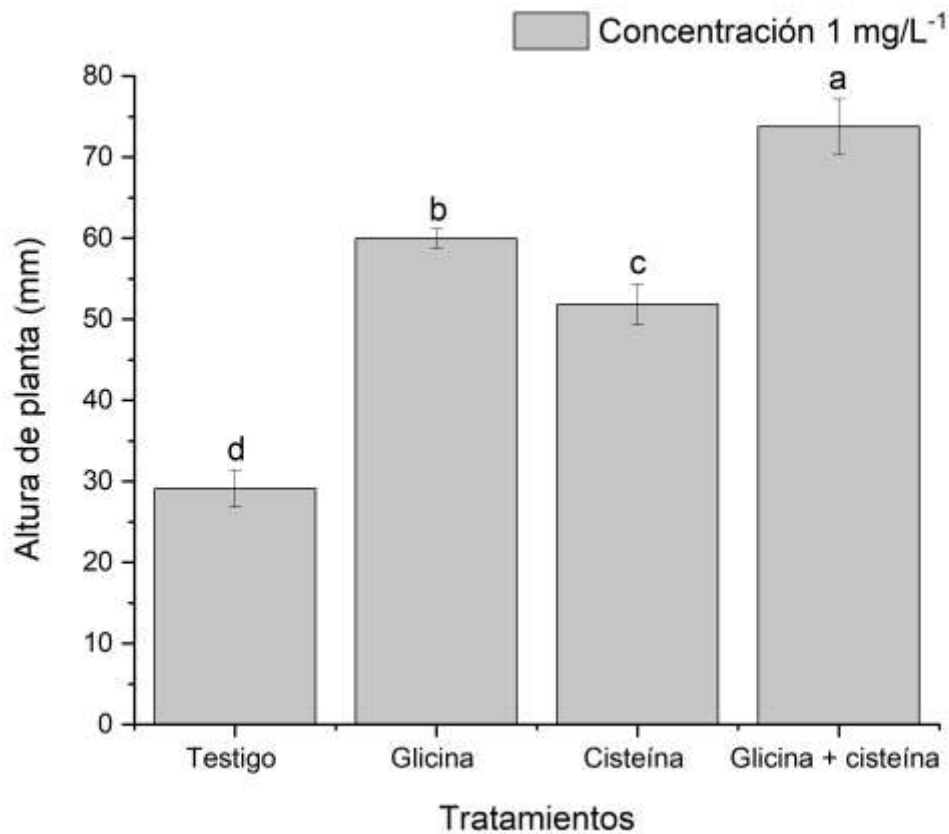


Figura 1. Efecto de los tratamientos glicina, cisteína y la combinación glicina + cisteína (1 mg/L⁻¹) sobre la altura de la planta. Las barras representan la media \pm error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) posterior al análisis de varianza (ANOVA).

Crecimiento radicular

Dentro de las variables de mayor importancia en lo que respecta el proceso de aclimatización se encuentra el desarrollo radicular. El efecto de la aplicación de los aminoácidos en el proceso de aclimatización en las vitroplantas en lo que respecta la variable de crecimiento radicular presentó resultados de manera visual (Fig. 2). Podemos mencionar que el tratamiento testigo desarrolló un sistema radicular deficiente, sin presencia de raíces secundarias y solo presentaba una raíz principal

en etapa de desarrollo. Por su parte, cada uno de los tratamientos evaluados; es decir, la cisteína, glicina y el tratamiento conjunto de estos dos aminoácidos promovieron el crecimiento radicular de las vitroplántulas. Sin embargo, las vitroplántulas con mayor abundancia radicular con presencia de raíces secundarias fueron las tratadas con la glicina + cisteína de manera conjunta, seguido por el tratamiento de glicina y por último la cisteína.



Figura 2. Desarrollo radicular de vitroplántulas de *D. nobile* "spring dream". Sometidas a los diferentes tratamientos de aminoácidos durante la aclimatización.

La presencia de raíces secundarias permite a la vitroplántulas a tener mayores posibilidades ante los procesos de estrés climáticos, por lo que la presencia de estas es esencial durante la etapa de aclimatización y endurecimiento radicular.

El análisis estadístico para la variable de longitud radicular los resultados demuestran diferencias estadísticas entre los tratamientos (Fig. 3). El grupo testigo este presentó una longitud radicular de 10 mm siendo este tratamiento el de menor tamaño y ubicándolo en el grupo estadístico d. La baja tasa de crecimiento radicular del tratamiento testigo valida el efecto de respuesta de los diferentes tratamientos aplicados en las unidades experimentales que contenían las vitroplántulas. Asimismo, el tratamiento de cisteína obtuvo una longitud radicular de 34 mm, con la presencia del crecimiento de raíces secundarias. De igual forma; la glicina presentó 48 mm de longitud radicular, mientras que el tratamiento conjunto de glicina + cisteína tuvo un promedio de 85 mm de longitud radicular, lo que ubicó a este tratamiento en el grupo estadístico a con una diferencia significativa ante los demás tratamientos. El fortalecimiento radicular de las vitroplántulas durante la etapa de aclimatización favorece al proceso de desarrollo del sistema vegetativo de estas ya que, al tener una estructura

radicular abundante, permitirá que el porcentaje de absorción de compuesto inorgánicos (sales minerales) al igual que agua sea mayor, permitiendo así el desarrollo vegetativo.

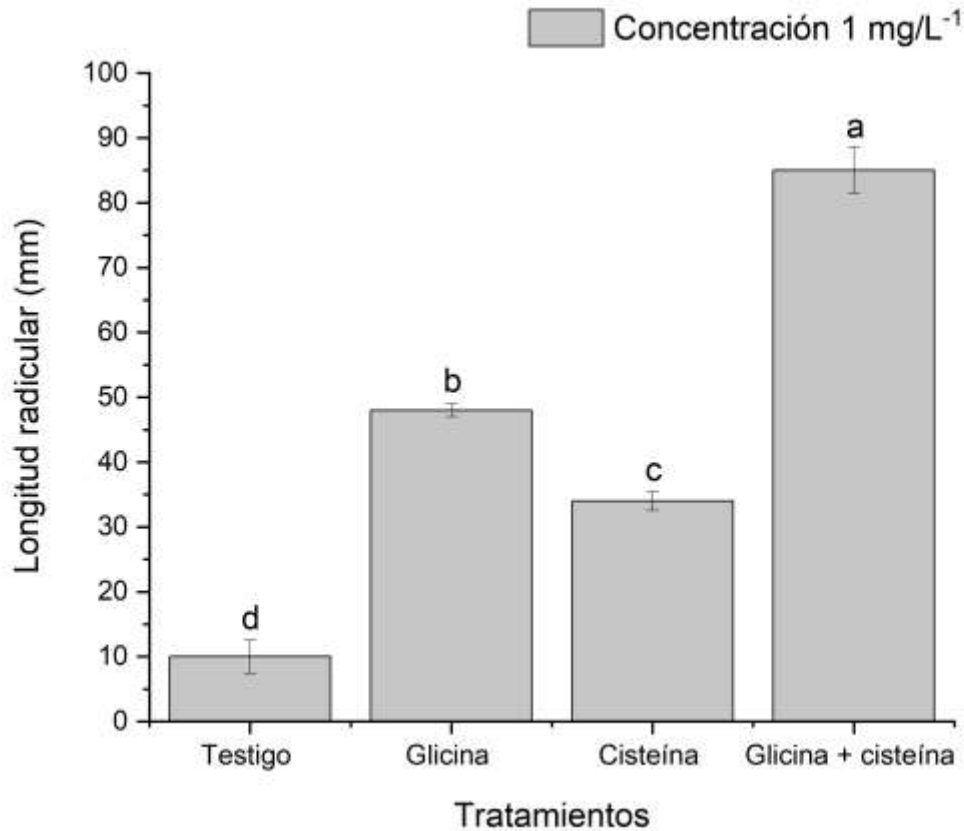


Figura 3. Efecto de los tratamientos glicina, cisteína y la combinación glicina + cisteína (1 mg/L^{-1}) sobre la longitud radicular. Las barras representan la media \pm error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) posterior al análisis de varianza (ANOVA).

Porcentaje de supervivencia

Los resultados del análisis de varianza para la variable de supervivencia demuestran una diferencia significativa en el tratamiento testigo, ya que este fue el que presentó menor porcentaje de supervivencia, con un promedio de 68%. Así mismo, los tratamientos de glicina, cisteína y la aplicación conjunta de estos aminoácidos no presentaron diferencia estadística alguna entre ellos. Debido a que la mortalidad de las vitroplántulas en cada uno de estos tratamientos osciló entre un 8% a 11%, por lo que el porcentaje de supervivencia registrado para estos tratamientos fue mayor al 89% (Cuadro 1). La aplicación de los tratamientos de aminoácidos permite a las plántulas adaptarse a las condiciones ambientales del medio donde se establecen durante el proceso de aclimatización. La participación específica de la glicina y cisteína están relacionados a disminuir el efecto de estrés ambiental, factor que se hace presente durante la etapa de aclimatización al extraer



las plantas del medio de cultivo y adaptarlas en las charolas correspondientes de trasplante (Sadak et al. 2020).

Tabla 1. Efecto de la aplicación de glicina, cisteína y la combinación de glicina + cisteína sobre el porcentaje de supervivencia de plántulas de *D. nobile* “spring dream”, durante la etapa de aclimatización.

Tratamiento	% supervivencia (E.E)	
Testigo	68 ± 2.45	a**
Cisteína	89 ± 1.54	b
Glicina	92 ± 2.35	b
Glicina + Cisteína	92 ± 1.87	b

Media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) posterior al análisis de varianza (ANOVA).

Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos podemos concluir que la respuesta de las plántulas a los tratamientos con aminoácidos presenta efectos positivos en lo que respecta su crecimiento vegetativo, radicular y el porcentaje de supervivencia. Siendo el tratamiento de aplicación conjunta (Glicina + Cisteína) el que mostró mejores resultados en las variables evaluadas. Por lo tanto, el uso y aplicación de estos dos aminoácidos en etapas tempranas benefician el desarrollo y aclimatación de plántulas pertenecientes al género *D. nobile* “spring dream”.

Referencias

- [1] Bordallo, P. N., Silva, D. H., Maria, J., Cruz, C. D., & Fontes, E. P. (2004). Somaclonal variation on in vitro callus culture potato cultivars. *Horticultura Brasileira*, 22(2), 300-304. <https://doi.org/10.1590/s0102-05362004000200027>.
- [2] Díaz, L. P., Namur, J. J., Bollati, S. A., & Arce, O. E. (2010). Aclimatization of *Phalaenopsis* and *Cattleya* obtained by micropropagation. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XII (2), 27-40.
- [3] Du Jardin, P. (2012). The science of plants biostimulants: a bibliographic analysis. EU.
- [4] Indacochea, B., Parrales, J., Castro, C., Vera, M., Gabriel, J. (2017). In vitro acclimatization of native forest species from Manabí southern in danger of extinction.
- [5] López, G., J. Ruíz y A. Masaguer. (2014). Evolución de sustratos orgánicos sostenibles en jardinería vertical. En *Actas de Horticultura* (67), 73-79 valencia, España: SECH.
- [6] Quijano, I. F. M., & Sandino, H. J. R. (2006). Efecto de reguladores de crecimiento, L-Cisteína y ácido ascórbico en el cultivo in vitro de mora de castilla (*Rubus glaucus* benth).



- [7] Romero, L. C., Aroca, M. Á., Laureano-Marín, A. M., Moreno, I., García, I., & Gotor, C. (2014). Cysteine and cysteine-related signaling pathways in *Arabidopsis thaliana*. *Molecular Plant*, 7(2), 264–276. <https://doi.org/10.1093/mp/sst168>
- [8] Sadak, M. S., Abd El-Hameid, A. R., Zaki, F. S. A., Dawood, M. G., & El-Awadi, M. E. (2020). Physiological and biochemical responses of soybean (*Glycine max L.*) to cysteine application under sea salt stress. *Bulletin of the National Research Centre*, 44(1). <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0259-7>
- [9] Sarawa, S., Halim, H., & Arma, M. J. (2016). Effect of biological fertilizer on the growth and nodules formation to soya bean (*Glicine max (L.) merrill*) in ultisol under net house conditions. *Journal Of Experimental Biology And Agricultural Sciences*, 4(6), 617-624. [https://doi.org/10.18006/2016.4\(issue6\).617.624](https://doi.org/10.18006/2016.4(issue6).617.624).
- [10] Silvia, J., Lalam, M., Echeverría, J., Salazar, S. (2016). Biotic and abiotic factors influencing acclimatization in the greenhouse. *Dom. Ciencias*, 2, 63-8
- [11] Xiaochuang, C., Chu, Z., Lianfeng, Z., Junhua, Z., Hussain, S., Lianghuan, W., & Qianyu, J. (2017). Glycine increases cold tolerance in rice via the regulation of N uptake, physiological characteristics, and photosynthesis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 112, 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.008>



Cinéticas de extracción acuosas de antocianinas a partir de *Clitoria ternatea*

A. Jiménez Hernández¹, A. Solano Vivanco¹, S. Y. Granados Balbuena¹, E. Ocaranza Sánchez², A. U. Flores Sánchez¹.

¹Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Tlaxcala. Guillermo Valle 11, Centro, C.P. 90000 Tlaxcala de Xicohténcatl, Tlaxcala.

²Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Ex-Hacienda San Juan Molino, C.P. 90700 Santa Inés Tecuexcomac, Tlaxcala.

sgranadosb@ipn.mx

Artículo: científico

Resumen

La flor de *Clitoria ternatea* representa una fuente de antocianinas con potencial aplicación como colorantes alimentarios naturales. El presente trabajo tuvo como objetivo determinar las condiciones óptimas para la extracción de antocianinas a partir de *Clitoria ternatea* mediante maceración dinámica. Se evaluó el efecto de la temperatura, la relación sólido-líquido y solvente sobre el rendimiento de extracción, empleando cinéticas de extracción y un diseño experimental Box-Behnken acoplado a metodología de superficie de respuesta (RSM).

El modelo predijo como condiciones óptimas 75 °C, una relación sólido-líquido de 1:10 y 40.404 % de etanol. Se identificaron condiciones experimentales con rendimientos estadísticamente equivalentes, con ventajas operativas al no requerir etanol y trabajar a temperaturas menores. El mayor contenido de antocianinas obtenido fue de 10.066 ± 3.254 mg/L, confirmando el potencial de *Clitoria ternatea* como fuente natural de colorantes para aplicaciones en la industria alimentaria.

Palabras clave: *Clitoria ternatea*, colorante natural, antocianinas, RSM

Introducción

Clitoria ternatea, comúnmente conocida como flor de guisante mariposa azul, es una planta herbácea perenne de la familia Fabaceae. Se encuentra en numerosos países con diferentes condiciones ambientales desde los altos niveles de humedad de Asia tropical, hasta el clima cálido y árido de Oriente Próximo, además de estar presente en regiones de América Central y del Sur, el Caribe y Madagascar. Su amplia distribución evidencia su adaptabilidad a las diversas condiciones climáticas de estas regiones (Sahu et al., 2023).

En los últimos años la flor de guisante de mariposa azul ha sido un foco de gran interés por sus posibles aplicaciones como colorante natural o una fuente rica de antioxidantes, tanto en sectores como la industria farmacéutica como alimentaria (Oguis et al., 2019)

Por otra parte, *Clitoria ternatea* es una fuente rica de antocianinas poliaciladas, consideradas como compuestos con mejor estabilidad frente a factores como temperatura, luz y pH en comparación con las antocianinas no aciladas, proporcionando una ventaja de ser utilizada como un agente colorante alimentario natural (Vidana Gamage et al., 2021).

Actualmente el uso de la *Clitoria ternatea* en alimentos ha sido aprobado por la FDA (Foods and Drugs Administration) permitiendo su aplicación en diversos alimentos, por lo tanto, bajo esta premisa resulta importante, como un primer paso para su potencial aplicación, determinar las metodologías específicas para lograr extraer la máxima concentración posible de



antocianinas minimizando su degradación junto con una tecnología respetuosa con el ambiente usando solventes orgánicos con la finalidad de ser adicionadas como colorantes en matrices alimentarias.

Existen diversos métodos de extracción de antocianinas como las convencionales como maceración dinámica, mecánica, difusión interna, infusión, Soxhlet, etc. en frío y las emergentes como lo es por ultrasonido, microondas, campos eléctricos pulsados, etc. Sin embargo, en el caso de las técnicas de extracción emergentes requiere de equipos costosos, que, en etapas posteriores, como un escalamiento a nivel piloto o industrial, representaría un mayor costo de implementación y de operación.

Por lo tanto, es de gran importancia buscar condiciones óptimas de extracción de antocianinas a partir de la flor de guisante de mariposa azul, con metodologías que impliquen el uso de tecnologías convencionales. Es por ello, que este trabajo se enfocó en establecer las condiciones óptimas de extracción de antocianinas de *Clitoria ternatea* por el método de maceración dinámica.

Metodología

Material vegetal

La flor deshidratada de *Clitoria ternatea* fue adquirida en el mercado local.

Cinéticas de extracción

Las extracciones se realizaron haciendo variaciones en la temperatura, relación sólido-líquido y solvente. Los parámetros se establecieron de acuerdo con Mustika et al. (2024), Jeyaraj et al. (2020), Jeyaraj et al. (2021).

El método de extracción fue maceración dinámica a 300 rpm, realizando variaciones en temperatura, relación sólido-líquido y disolvente. Las temperaturas evaluadas fueron de 60 °C, 67.5 °C y 75 °C, relaciones sólido-líquido 1:10, 1:20 y 1:30 y los disolventes; agua 100%, agua:etanol (75:25 v/v) y agua:etanol (50/50 v/v).

Los tiempos de la cinética de extracción fueron 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 y 300 minutos.

Diseño experimental Box-Behnken (BBD)

Para encontrar las condiciones óptimas se usó un diseño experimental Box-Behnken. Los datos fueron ordenados de acuerdo con la temperatura, relación y el solvente a utilizar.

Tabla 1. Factores de temperatura, solvente y relación.

Corrida	Temperatura	Relación	Solvente
1	60	30	25
2	75	30	25
3	60	10	25
4	75	10	25
5	60	20	50
6	75	20	50
7	60	20	0
8	75	20	0
9	67.5	30	50
10	67.5	10	50
11	67.5	30	0
12	67.5	10	0
13	67.5	20	25
14	67.5	20	25
15	67.5	20	25

En el diseño los ejes fueron los factores de temperatura, solvente y relación, los valores (-1, 0, 1) representan si es el valor menor central o mayor (60, 67.5, 75). 1 = 1:30, 2 = 1:20, 3 = 1:10.

Contenido de antocianinas

Se evaluó el contenido de antocianinas mediante el método de pH diferencial (Granados-Balbuena et al. 2022).

El rendimiento de extracción del contenido de antocianina se expresa como mg equivalentes de cianidina-3-glucósido por gramo de pétalo:

$$\text{Rendimiento de extracción de antocianinas } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{\text{Abs} * \text{PM} * \text{FD} * 1000}{(\epsilon * L)}$$

Donde Abs se refiere a la absorbancia; PM es el peso molecular de la cianidina-3-glucosido; FD es el factor de dilución del extracto; V es el volumen del extracto (L); 1000 es un factor de conversión de g a mg y L es la longitud de la cubeta.

Caracterización del color del extracto

El color de los puntos con mayor concentración de antocianinas fue medido a través de un colorímetro DS-200. Las condiciones de lectura fueron; fuente de luz D, ángulo de campo de visión de 10°, intervalo de longitud de onda 1 nm y longitud de onda de entre 400-700 nm.

Resultados y discusión

Cinéticas de extracción de antocianinas

La Figura 1 muestra el progreso de la concentración de antocianinas durante las cinéticas de extracción utilizando diferentes composiciones de disolvente: (a) agua al 100%, (b) etanol al 50% y (c) etanol al 25%. La mayor concentración de antocianinas se obtuvo en la cinética 4 (Figura 1c), alcanzando un valor de 10.066 ± 3.2537 mg/L, equivalente a 1.066 ± 0.3253 mg de cianidina-3-glucósido por gramo de flor seca, bajo las condiciones de 25% de etanol, 75% de agua, una relación sólido-líquido de 1:10 y una temperatura de 75 °C, después de 180 min de extracción. Este resultado es consistente con lo reportado por Chusak et al. (2018), quienes obtuvieron 1.08 ± 0.12 mg/g mediante maceración durante 4 h a 90–95 °C y una relación sólido-líquido de 1:20, así como por Chong y Gwee (2015), quienes reportaron 1.126 mg/g utilizando extracción asistida por ultrasonido durante 150 min a 50 °C, con una relación sólido-líquido de 1:20 y una potencia de 240 W.

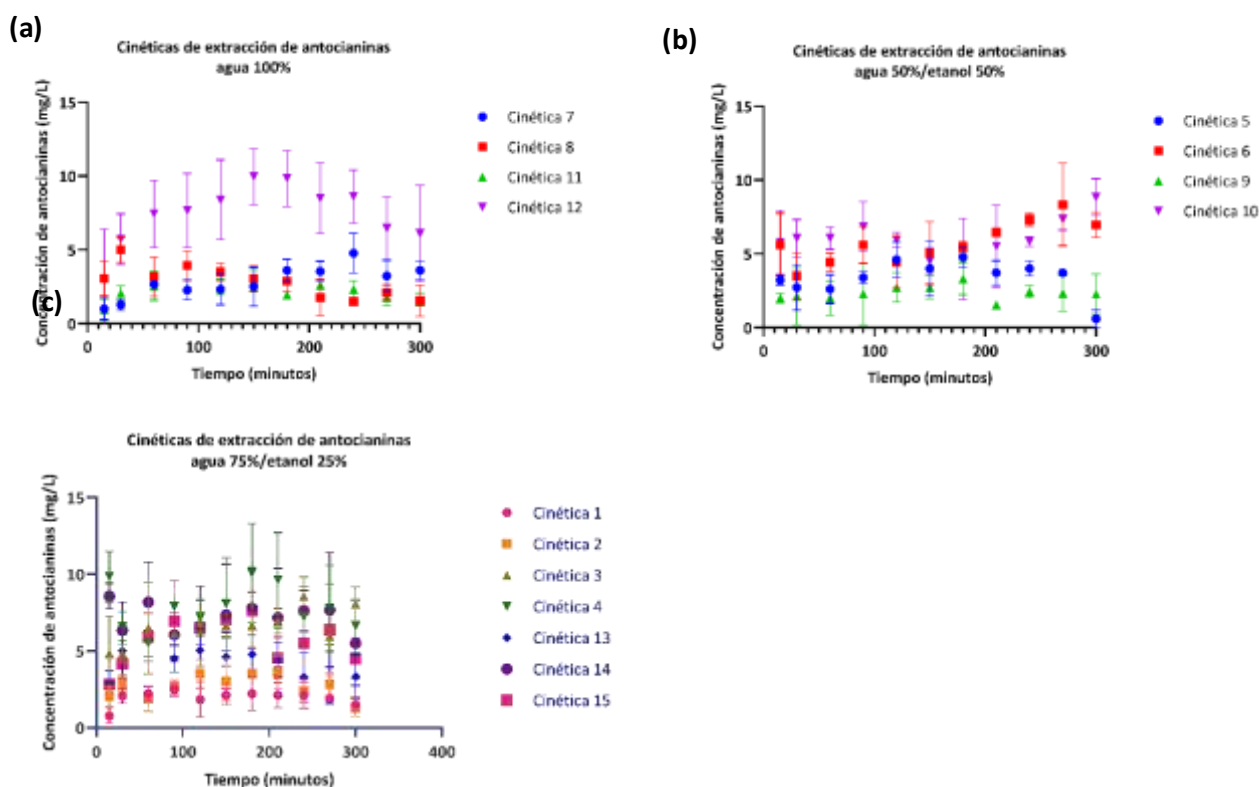


Figura 1. Cinéticas de extracción de antocianinas: a) 100% agua; b) 50% etanol; c) 25% etanol.



En la Tabla 2 se presentan el contenido de antocianinas extraídas en las 15 cinéticas; de acuerdo con el análisis estadístico (Tukey $p < 0.05$), las cinéticas 3, 4, 6, 10, 12, 14, 15 constituyeron la agrupación con los mayores rendimientos ($7.619 \pm 1.2297 - 10.066 \pm 3.2537$ mg/L)

Tabla 2. Contenido de antocianinas y caracterización cromática en el espacio CIELab*

Cinética	Temperatura (°C)	Relación m/v (%)	Solvente	Max. concentración de antocianinas obtenidas (mg/L)	Coordenadas CIELAB	Color
1	60	01:30	Agua 75%/ etanol 25%	2.5026 ± 0.4414 D	L* 60.26 a* 4.68 b* -46.6	
2	75	01:30	Agua 75%/ etanol 25%	3.6148 ± 1.0726 CD	L* 75.79 a* 10.99 b* -56.17	
3	60	01:10	Agua 75%/ etanol 25%	8.5644 ± 1.2522 AB	L* 57.86 a* 11.98 b* -47.12	
4	75	01:10	Agua 75%/ etanol 25%	10.066 ± 3.2537 A	L* 35.42 a* 11.07 b* -61.47	
5	60	01:20	Agua 50%/ etanol 50%	4.7827 ± 0.6742 BCD	L* 65.56 a* 12.02 b* -42.02	
6	75	01:20	Agua 50%/ etanol 50%	8.342 ± 2.8066 AB	L* 71.01 a* 23.7 b* -72.13	
7	60	01:20	Agua 100%	4.7827 ± 1.3485 BCD	L* 33.19 a* 9.2 b* -41.19	



...Continuación Tabla 2. Contenido de antocianinas y caracterización cromática en el espacio CIELab*

8	75	01:20	Agua 100%	5.0052±0.8342 BCD	L*	73	
					a*	17.69	
					b*	-49.9	
9	67.5	01:30	Agua 50%/ etanol 50%	3.3368±1.0940 CD	L*	76.96	
					a*	4.44	
					b*	-43.59	
10	67.5	01:10	Agua 50%/ etanol 50%	8.8425±1.2596 AB	L*	68.12	
					a*	12.15	
					b*	-45.67	
11	67.5	01:30	Agua 100%	2.8918±0.7523 D	L*	32.38	
					a*	7.92	
					b*	-28.59	
12	67.5	01:10	Agua 100%	9.9547±1.8973 A	L*	27.2	
					a*	11.88	
					b*	-33.48	
13	67.5	01:20	Agua 75%/ etanol 25%	5.0608±1.8301 BCD	L*	44.97	
					a*	12.93	
					b*	-41.02	
14	67.5	01:20	Agua 75%/ etanol 25%	8.5644±0.8561 AB	L*	41.55	
					a*	13.39	
					b*	-36.5	
15	67.5	01:20	Agua 75%/ etanol 25%	7.619±1.2297 ABC	L*	60.67	
					a*	16.37	
					b*	-55.98	

Valores con letras distintas en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0.05$).

Por otro lado, a través de la correlación Pearson se determinó que entre las concentraciones de antocianinas y la coordenada b^* (positiva asociada a las tonalidades amarillas/negativa asociada a la tonalidad azul) fue de -0.2190 , indicando una correlación débil a los tonos azules.

Optimización de la extracción de antocianinas

De acuerdo con el análisis mediante metodología de superficie de respuesta (RSM), la temperatura ($p = 0.026$) y la relación sólido-líquido (m/v) ($p < 0.001$) ejercieron un efecto significativo sobre la extracción de antocianinas, mientras que la composición del solvente no presentó un efecto lineal significativo ($p = 0.340$). A partir de los datos experimentales se ajustó el siguiente modelo cuadrático para predecir la concentración de antocianinas:

$$Y = -88.0 + 2.12A + 1.82B + 0.410C - 0.01265A^2 - 0.183B^2 - 0.001027C^2 + 0.0130AB - 0.00445AC + 0.0156BC$$

Donde A corresponde a la temperatura de extracción ($^{\circ}C$), B a la relación sólido-líquido (m/v) y C al porcentaje de agua en la solución hidroalcohólica (%). La prueba de falta de ajuste no fue significativa ($p = 0.534$), lo que indica que el modelo cuadrático describió adecuadamente la variabilidad observada en el sistema experimental.

Con base en el modelo ajustado, se generaron tres superficies de respuesta para evaluar el efecto combinado de la temperatura, la relación sólido-líquido y la composición del solvente sobre la concentración de antocianinas (Figuras 2). El análisis de optimización predijo como condiciones óptimas de extracción una temperatura de $75^{\circ}C$, una relación sólido-líquido de $1:10$ y una mezcla hidroalcohólica compuesta por 59.596% de agua y 40.404% de etanol. Bajo estas condiciones, el modelo estimó una concentración máxima teórica de antocianinas de 10.455 mg/L .

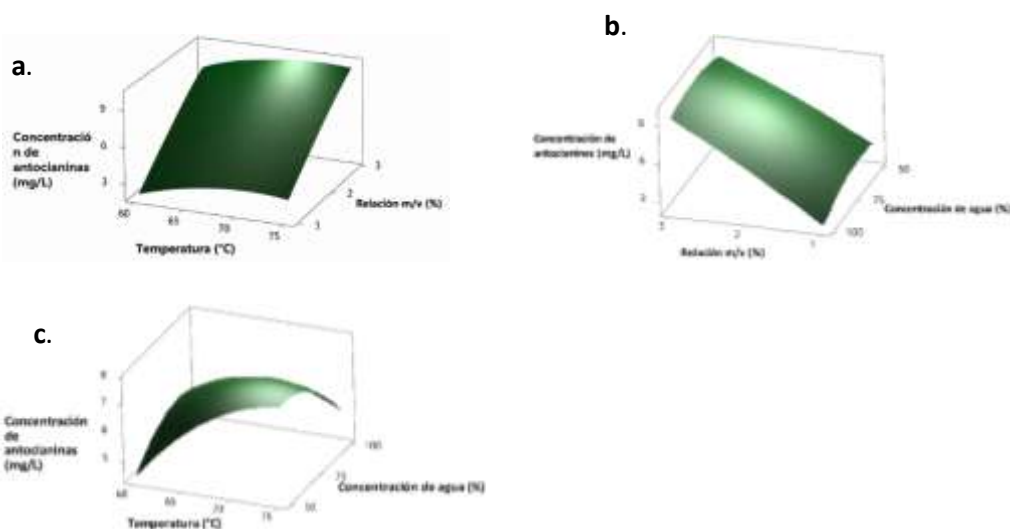


Figura 2. Influencia e interacción de los parámetros evaluados: (a) concentración antocianinas (mg/L), la relación m/v (%) y la temperatura ($^{\circ}C$), (b) concentración de antocianinas (mg/L) con la concentración de agua en el solvente (%) y la relación m/v (%), (c) concentración de antocianinas (mg/L) con la concentración de agua en el solvente (%) y la temperatura ($^{\circ}C$).

Posteriormente, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Dunnett utilizando como control la concentración máxima teórica de antocianinas predicha por el modelo. Los resultados indicaron que las cinéticas 3, 4, 6, 10, 12, 14 y 15 no presentaron diferencias estadísticamente significativas con respecto a dicho valor (Figura 3), lo que sugiere que estas condiciones de extracción permiten alcanzar rendimientos equivalentes al óptimo estimado.

Entre las condiciones evaluadas, la cinética 12 destacó por su relevancia práctica, ya que permitió obtener una concentración de antocianinas comparable a la predicha por el modelo sin requerir la adición de etanol como co-solvente. Esta condición representa una ventaja desde el punto de vista tecnológico y económico, al simplificar el proceso de extracción, eliminar la necesidad de etapas posteriores de recuperación del solvente y reducir los costos asociados al escalamiento del proceso.

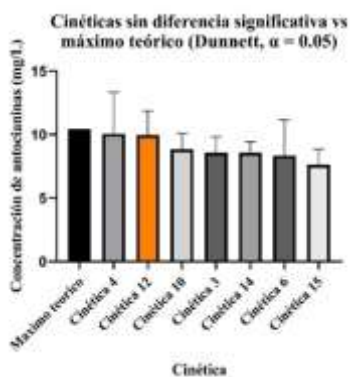


Figura 3. Cinéticas sin diferencia significativa con el máximo teórico (Dunnett $p < 0.05$).

Trabajo a futuro

En este estudio se optimizaron las condiciones de extracción de antocianinas a partir de flores de *Clitoria ternatea* mediante maceración dinámica. No obstante, el empleo y desarrollo de metodologías a través de tecnologías emergentes como la extracción asistida por ultrasonido (UAE), microondas (MAE), irradiación y campos eléctricos pulsados (PEF) sería el siguiente paso obligatorio a explorar, ya que es bien conocido que permiten intensificar la transferencia de masa y reducir los tiempos de extracción de horas a minutos, disminuyendo la exposición térmica de las antocianinas, que puede traducirse en una reducción de los costos operativos y del consumo de disolventes.

Aunque estas tecnologías aún presentan desafíos asociados a su escalamiento industrial, es necesario profundizar en su estudio y comprensión para desarrollar, a futuro, estrategias de diseño y optimización de procesos que permitan su implementación a escala industrial.

Conclusiones

La metodología de superficie de respuesta permitió identificar como condiciones óptimas de extracción 75 °C, una relación sólido-líquido de 1:10 y una mezcla de 59.596% de agua y 40.404% de etanol. No obstante, el análisis estadístico mostró que el rendimiento obtenido bajo estas condiciones no difirió significativamente del alcanzado de la cinética con las condiciones, 67.5 °C, relación 1:10 y 100% agua. Dado que esta última condición elimina el uso de etanol y opera a una temperatura menor, representa la alternativa más adecuada para la obtención de extractos de antocianinas de *Clitoria ternatea* destinados a aplicaciones alimentarias, al ofrecer ventajas en términos de simplicidad del proceso, eficiencia energética y viabilidad económica para su escalamiento industrial.

Referencias

- [1] Chusak, C., Thilavech, T., Henry, C. J., & Adisakwattana, S. (2018). Acute effect of Clitoria ternatea flower beverage on glycemic response and antioxidant capacity in healthy subjects: a randomized crossover trial. *BMC Complementary And Alternative Medicine*, 18(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s12906-017-2075-7>
- [2] Chong, F. C., & Gwee, X. F. (2015). Ultrasonic extraction of anthocyanin from Clitoria ternatea flowers using response surface methodology. *Natural Product Research*, 29(15), 1485-1487. <https://doi.org/10.1080/14786419.2015.1027892>
- [3] Jeyaraj, E. J., Lim, Y. Y., & Choo, W. S. (2020). Extraction methods of butterfly pea (Clitoria ternatea) flower and biological activities of its phytochemicals. *Journal Of Food Science And Technology*, 58(6), 2054-2067. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04745-3>
- [4] Jeyaraj, E. J., Lim, Y. Y., & Choo, W. S. (2021). Effect of Organic Solvents and Water Extraction on the Phytochemical Profile and Antioxidant Activity of Clitoria ternatea Flowers. *ACS Food Science & Technology*, 1(9), 1567-1577. <https://doi.org/10.1021/acscfoodscitech.1c00168>
- [5] Marpaung, A. M., Andarwulan, N., Hariyadi, P., & Faridah, D. N. (2017). The colour degradation of anthocyanin-rich extract from butterfly pea (Clitoria ternatea L.) petal in various solvents at pH 7. *Natural Product Research*, 31(19), 2273-2280. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1303689>
- [6] Mustika, P. C. B. W., Priyantini, H. R., Krisna, E. D., Aldani, F., Sawali, F. D. I., Afandy, M. A., & Mustikaningrum, M. (2024). Extraction of Natural Colorant from Clitoria ternatea Flowers Using Conventional Solvent Extraction (CSE) and Ultrasound-Assisted Extraction (UAE) Techniques: Kinetic Modeling and Compound Stability. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 27(11), 549-559. <https://doi.org/10.14710/jksa.27.11.549-559>
- [7] Oancea, S. (2021). A Review of the Current Knowledge of Thermal Stability of Anthocyanins and Approaches to Their Stabilization to Heat. *Antioxidants*, 10(9), 1337. <https://doi.org/10.3390/antiox10091337>
- [8] Oguis, G. K., Gilding, E. K., Jackson, M. A., & Craik, D. J. (2019). Butterfly Pea (Clitoria ternatea), a Cyclotide-Bearing Plant With Applications in Agriculture and Medicine. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00645>
- [9] Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. (2012). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food And Bioprocess Technology*, 6(1), 36-60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- [10] Saccenti, E. (2023). What can go wrong when observations are not independently and identically distributed: A cautionary note on calculating correlations on combined data sets from different experiments or conditions. *Frontiers In Systems Biology*, 3, 1042156. <https://doi.org/10.3389/fsysb.2023.1042156>
- [11] Sahu, D., Sahu, J. K., Kumar, V., & Tamrakar, S. K. (2023). Phytochemicals and Medicinal Uses of Clitoria ternatea. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(18), 942–951. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i183405>
- [12] Vidana Gamage, G. C., Lim, Y. Y., & Choo, W. S. (2021). Anthocyanins From Clitoria ternatea Flower: Biosynthesis, Extraction, Stability, Antioxidant Activity, and Applications. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.792303>



Nivel de aceptación de tortilla alto-proteica elaborada a partir de maíz nativo

Vázquez-Luna D.^a, Lara-Rodríguez D.A.^{a*}, Leyva-Cordero R.^b, Jiménez-Nestoso G.^b

^a Centro de Estudios Interdisciplinarios en Agrobiodiversidad; ^b Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria, Universidad Veracruzana

*dlara@uv.mx

Artículo científico

Resumen—Se analizó el grado de aceptación de tortillas alto-proteicas elaboradas a partir de tres tipos de maíz nativo (Amarillo crema, Blanco olotillo y Morado) de la comunidad La Victoria 1, Municipio de Sayula de Alemán, Veracruz. Se emplearon 750 g de maíz sin germinar y 750 g de maíz germinado por tipo; la germinación se realizó durante 48 h en anaqueles con riego nebulizado en fase oscura, seguida de nixtamalización y elaboración en fogón con leña. El análisis sensorial se realizó mediante encuesta a 30 evaluadores con seis indicadores (textura, color, sabor, presentación, olor y suavidad) valorados en escala de mala, regular y buena. Se encontraron diferencias significativas en sabor ($p=0.0212$) y suavidad ($p=0.0002$) a favor del maíz germinado; el Blanco olotillo germinado obtuvo los mejores valores en ambos indicadores. Los indicadores de textura, color, presentación y olor no presentaron diferencias significativas. La disposición a pagar fue de \$25-\$30/kg para ambos tratamientos.

Palabras clave: *Maíz nativo; germinación; tortilla; análisis sensorial; nixtamalización.*

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es un cereal originario de México con al menos 64 razas nativas preservadas por comunidades campesinas e indígenas a lo largo de siglos, constituyendo al país como el principal centro mundial de diversificación genética de este grano [1]. La tortilla es el alimento base de la dieta mexicana con un consumo per cápita de aproximadamente 120 kg por año; aporta cerca del 45% de las calorías, 39% de las proteínas y 49% del calcio de la población, con una contribución aún mayor en zonas rurales, donde representa hasta el 70% de las calorías y 50% del consumo proteico diario [2]. A pesar de su relevancia nutricional, la tortilla obtenida por nixtamalización tradicional presenta deficiencias en aminoácidos esenciales —particularmente lisina y triptófano, limitantes en los cereales [3]—, lo que ha motivado estrategias orientadas a mejorar su perfil proteico sin alterar las propiedades organolépticas ni el proceso artesanal tradicional.

La germinación previa al grano de maíz activa enzimas proteolíticas que incrementan considerablemente la concentración de lisina y triptófano, mejorando el perfil nutricional sin modificar el proceso de nixtamalización ni las características sensoriales del producto final [3]. Este enfoque se enmarca en la tendencia de la "nueva generación de tortillas" funcionales que combina tradición, valor nutritivo mejorado y atributos sensoriales diferenciados, documentada como una de las líneas de innovación más activas en la industria alimentaria mexicana [5]. Los maíces nativos, además de su valor culinario, representan un patrimonio biocultural insustituible: Félix-Sámano *et al.* (2025) confirmaron que la nixtamalización de maíces nativos de la milpa produce tortillas con calidad nutricional mejorada sin comprometer sus propiedades sensoriales, validando el procesamiento artesanal tradicional como estrategia eficaz de mejora alimentaria [4].

El objetivo del presente trabajo fue analizar el grado de aceptación sensorial de tortillas alto-proteicas elaboradas a partir de maíz nativo germinado y no germinado (Amarillo crema, Blanco olotillo y Morado) de la región sureste de Veracruz, mediante un estudio con consumidores de la Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria de la Universidad Veracruzana.

Metodología

Materiales y sitio de estudio

Se utilizaron tres variedades de maíz nativo (Blanco olotillo, Amarillo crema y Morado) obtenidas de la comunidad La Victoria 1, Municipio de Sayula de Alemán, Veracruz. El estudio sensorial se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria (FISPA), Universidad Veracruzana, Región Coatzacoalcos-Minatitlán, ubicada en la Carretera Costera del Golfo km 220, Col. Agrícola y Ganadera Michapan.

Preparación del material vegetal y elaboración de tortillas

Para cada tratamiento —maíz sin germinar (SG) y maíz germinado (G)— se pesaron 750 g por tipo. La humedad del grano se determinó con un Grain Moisture Meter (Smart Sensor). El maíz se desinfectó con hipoclorito de sodio al 1% (30 s) y se escarificó con hidróxido de calcio al 10%, reposando 12 h en fase oscura; posteriormente se colocó en anaqueles con riego nebulizado en oscuridad total durante 48 h para favorecer una germinación rápida y uniforme. La nixtamalización se realizó con 5.25 g de cal y 1.5 L de agua por cada 750 g de maíz, a una temperatura mínima de 98.8 °C durante 47.5 min para SG y 22.4 min para G —tiempo significativamente menor que evidencia el ablandamiento del pericarpio por germinación—. La masa se amasó con 150-250 mL de agua; se formaron esferas de 32 ± 2 g que se tortillaron manualmente y se cocieron en fogón con leña, técnica que confiere un perfil sensorial característico al producto.

Análisis sensorial y estadístico

Se aplicaron 30 encuestas a estudiantes y personal de la FISPA-UV. Cada encuesta incluyó seis indicadores: textura, color, sabor, presentación, olor y suavidad, valorados en escala de tres niveles (mala, regular y buena), más tres preguntas abiertas sobre características del favorito, sugerencias de mejora y disposición a pagar por kilogramo. Los datos cuantitativos se analizaron con el software Dyane versión 4 mediante prueba ji cuadrada con tabulación cruzada ($p < 0.05$). Los datos cualitativos se procesaron con nubes de palabras (www.nubedepalabras.es), y el rendimiento de masa y tortilla se evaluó por comparación directa de pesos entre tratamientos en cada etapa del proceso.

Resultados y discusión

Textura

No se encontraron diferencias significativas en textura ($p=0.1230$). El Morado germinado (M3G) registró la mayor proporción de calificaciones "mala" (40%), mientras que el Blanco olotillo germinado (M1G) obtuvo la mayor aceptación positiva (21.74% "buena"). La ausencia de efecto significativo indica que la germinación no comprometió la estructura del almidón nativo en las tres variedades evaluadas. Acosta-Estrada *et al.* (2023) evaluaron más de 30 características físicas y

químicas en tortillas elaboradas con cinco híbridos, dos variedades y cinco razas nativas de maíz bajo condiciones controladas de nixtamalización, confirmando que la variedad genética tiene un efecto más determinante sobre la textura que el método de procesamiento; las razas nativas presentaron propiedades físicas distintivas —mayor retención de pericarpio, distinta dureza de masa y mayor humedad de nixtamal— respecto a los genotipos mejorados [6]. En esta misma línea, Palacios-Pola *et al.* (2025) demostraron en tortillas artesanales de maíz nativo de Chiapas que las propiedades funcionales y sensoriales del producto están determinadas en gran medida por los cambios estructurales del almidón durante la nixtamalización y el cocimiento, y que las mujeres productoras han refinado parámetros de calidad —incluyendo textura y contenido de almidón resistente— a través del uso de variedades nativas que preservan características tradicionales [7]. Estos antecedentes sugieren que el efecto varietal documentado para el maíz Blanco olotillo —reconocido por su endospermo de dureza intermedia— contribuye más que la germinación a la mayor aceptación de textura observada en M1G.

Color

El color tampoco presentó diferencias significativas ($p=0.2457$). Las tortillas con mayor aceptación positiva en color fueron el Blanco olotillo germinado (M1G) y el Morado germinado (M3G), ambas con 19.18% de calificaciones "buena". La tortilla Amarillo crema sin germinar (M2SG) registró la mayor proporción de calificaciones "mala" (33.33%). Aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa, se aprecia una tendencia a favor de los maíces germinados, posiblemente relacionada con cambios en los pigmentos durante la germinación. Gutiérrez-Llanos *et al.* (2023) estudiaron el color y las características nutraceuticas de tortillas de maíces nativos preparadas con diferentes dosis de álcali y condiciones de refrigeración, encontrando que las antocianinas del pericarpio y la aleurona del maíz morado se degradan en 39-49% durante la nixtamalización —dependiendo de la concentración de cal y la temperatura de cocción—, aunque el producto final conserva tonalidades atractivas y capacidad antioxidante significativa [8]. La germinación puede modificar ligeramente la distribución y bioaccesibilidad de estos pigmentos a través de la activación de glicosidasas, lo que explicaría la tendencia a mayor aceptación de color en los maíces pigmentados germinados. Confirmando el creciente interés institucional en los maíces nativos de colores, en 2025 Salinas-Moreno *et al.* reportaron el lanzamiento del híbrido H-304 R, un maíz rojo con pigmento en pericarpio y capa de aleurona desarrollado para el subtrópico de México, que obtuvo buena calificación sensorial en color, textura crujiente y valor nutraceutico para tortillas e insuflados, indicando que este segmento de mercado tiene proyección productiva [9].

Sabor

El sabor fue uno de los dos indicadores con diferencias estadísticamente significativas ($p=0.0212$). Las tortillas con maíz germinado obtuvieron las mayores proporciones de calificaciones "buena": Blanco olotillo germinado (M1G) con 21.82%, Morado germinado (M3G) con 20.00% y Amarillo crema germinado (M2G) con 18.18%. En contraste, los maíces sin germinar obtuvieron valores inferiores: Blanco olotillo SG con 15.45%, Morado SG con 12.73% y Amarillo crema SG con 11.82%,



evidenciando que la germinación produce una mejora consistente y estadísticamente demostrable en el sabor de la tortilla.

La mejora en el sabor se atribuye a cambios bioquímicos ocurridos durante la germinación: la activación de enzimas proteolíticas y glucosidasas genera aminoácidos libres —lisina, valina, leucina y cisteína— y azúcares reductores que actúan como precursores de la reacción de Maillard durante el cocimiento en comal. Una revisión reciente sobre la reacción de Maillard en alimentos (Foods, 2025) documenta que estos precursores, al someterse al calor, producen pirazinas, furanos, tiofenos y compuestos azufrados volátiles que confieren notas aromáticas complejas tipo "cereal tostado" y, en concentraciones más altas, notas que los consumidores del presente estudio asociaron con "carne" [10]. Hassan *et al.* (2024) confirmaron en tortillas nixtamalizadas de maíz proteico (QPM) que la mejora del perfil de lisina y triptófano incrementó significativamente ($p < 0.05$) la aceptabilidad sensorial en sabor y aroma sin comprometer la textura ni la apariencia, lo que confirma la compatibilidad entre el incremento de aminoácidos esenciales —derivado de la germinación en el presente estudio— y la mejora paralela en las propiedades sensoriales [3]. Sánchez-Magaña *et al.* (2025) señalan que la mejora del sabor mediante estrategias de enriquecimiento natural es precisamente uno de los pilares de la "nueva generación de tortillas" funcionales que busca combinar identidad cultural y calidad nutricional [5].

Presentación

La presentación no mostró diferencias significativas ($p = 0.7032$). El Morado germinado obtuvo la mayor proporción de calificaciones "buena" (20.59%), mientras que cuatro tratamientos acumularon 25% de calificaciones "mala" cada uno. Esta variabilidad está relacionada con el proceso artesanal de elaboración en fogón de leña, que genera irregularidades en la forma circular, quemaduras superficiales y deformaciones en los bordes —aspectos que los propios consumidores identificaron como áreas de mejora en las preguntas abiertas.

Villanueva-Pimentel *et al.* (2024) evaluaron sensorialmente tortillas artesanales de maíz criollo Mushito de Pátzcuaro, Michoacán, nixtamalizadas de forma tradicional y adicionadas con harinas de amaranto, linaza y avena, aplicando un focus group a 38 estudiantes consumidores habituales de tortillas artesanales. Encontraron que la tortilla tradicional enriquecida superó a la tortilla comercial en la mayoría de los indicadores sensoriales, pero identificaron la presentación como el atributo con mayor área de oportunidad, señalando que los consumidores esperan tortillas con forma circular uniforme, color homogéneo y ausencia de quemaduras —coincidiendo exactamente con las observaciones del presente estudio [11]—. Rodríguez-Álvarez *et al.* (2024), en su estudio sobre significados de compra de tortillas artesanales de maíz nativo en Nuevo León, encontraron que la dimensión de "presentación y elaboración" es uno de los cuatro atributos que determinan la percepción de calidad del producto artesanal, por lo que estandarizar la presentación visual mediante prensas mejoradas o comal controlado sería clave para la diferenciación comercial de las tortillas de maíz nativo germinado en el mercado regional [12].

Olor

El indicador de olor no presentó diferencias significativas ($p=0.0676$), aunque el valor p se aproximó al umbral de significancia, sugiriendo una tendencia hacia la diferenciación. El Blanco olotillo germinado obtuvo la mayor aceptación positiva (21.24%), seguido del Morado germinado (20.35%). Por otro lado, el Blanco olotillo sin germinar y el Morado germinado registraron los niveles más altos de calificaciones "mala" en olor (33.33% cada uno), indicando que el olor de algunas muestras germinadas generó respuestas divididas entre los evaluadores.

Las respuestas polarizadas observadas para el olor de las tortillas germinadas son explicables por los mecanismos de la reacción de Maillard documentados recientemente. La generación de tiofenos, tiazoles y compuestos azufrados durante el cocimiento —a partir de cisteína, metionina y glicina liberadas por proteólisis durante la germinación— produce notas "a carne asada" y "a cereales tostados" cuyos umbrales de percepción varían en órdenes de magnitud entre individuos, lo que produce respuestas sensoriales altamente diferenciadas ante los mismos compuestos [10]. Rodríguez-Álvarez *et al.* (2024) señalan que el aroma es uno de los tres atributos sensoriales que más contribuyen a la percepción de calidad e identidad en las tortillas artesanales de maíz nativo, junto al sabor y el color [12]. En consecuencia, ampliar el panel sensorial a consumidores habituados a productos fermentados o germinados podría incrementar la aceptación de este indicador, dado que la familiaridad previa con notas aromáticas complejas reduce la percepción de extrañeza ante compuestos volátiles no convencionales.

Suavidad

La suavidad fue el indicador con mayor nivel de significancia estadística ($p=0.0002$), confirmando que la germinación tiene un efecto marcado y consistente sobre esta propiedad. El Blanco olotillo germinado obtuvo 25.00% de calificaciones "buena", seguido del Amarillo crema germinado (22.83%) y el Morado germinado (19.57%). En el extremo opuesto, el Blanco olotillo sin germinar fue el que peor puntuó en este indicador, con 26.76% de calificaciones "regular" y solo 7.61% de "buena", la proporción más baja de todos los tratamientos.

La germinación hidrata y ablanda el pericarpio del grano, resultando en una masa con mayor retención de agua durante la nixtamalización y una tortilla final con mayor suavidad percibida. Palacios-Pola *et al.* (2025) confirmaron que las variedades nativas con mayor proporción de almidón de baja dureza producen tortillas más suaves y con mejor retención de humedad a corto plazo, y que el efecto de la germinación sobre la suavidad es aditivo al efecto varietal inherente del maíz criollo [7]. En este sentido, el maíz Blanco olotillo —reconocido en la literatura por su endospermo de dureza intermedia a suave— se beneficia especialmente de la germinación, lo que explicaría su supremacía en el indicador de suavidad. Hassan *et al.* (2024) corroboraron en tortillas con perfil proteico mejorado que los indicadores de suavidad e inflado no se ven comprometidos por la modificación del contenido de aminoácidos esenciales, confirmando que el incremento proteico derivado de la germinación es compatible con una excelente calidad textural [3]. La evaluación de suavidad a las 24 horas de almacenamiento constituye un siguiente paso relevante para caracterizar la estabilidad del producto elaborado con maíz nativo germinado.

Evaluación cualitativa: nubes de palabras

El análisis cualitativo complementó y enriqueció los resultados cuantitativos. Para las tortillas sin germinar, los atributos que más frecuentemente motivaron la elección del favorito fueron el sabor, el color, la textura y el olor. Al preguntarles qué mejorarían, los consumidores mencionaron la textura, el sabor y la presentación, señalando preferencia por tortillas "suaves, blanditas y sin deformaciones". Los términos más frecuentes para describir el recuerdo que generaron fueron "agradable", "normal" y "tradicional", indicando una experiencia equiparable a la tortilla convencional, sin elementos diferenciadores notables.

Para las tortillas germinadas, los atributos del favorito más mencionados fueron la suavidad, el sabor, el color y el olor. Los evaluadores describieron el recuerdo que les generaban con términos como "sabroso", "innovador", con asociaciones olfativas a "carne" y "cereales tostados" — coherentes con los compuestos de Maillard generados a partir de aminoácidos libres y azúcares reductores durante la germinación y cocción en fogón de leña [10] —. La percepción de "innovación" es especialmente relevante desde una perspectiva comercial: un estudio reciente sobre significados de compra y disposición a pagar por tortillas artesanales de maíz nativo en Nuevo León (2024) documentó que los consumidores perciben la tortilla nixtamalizada de maíz criollo como saludable, natural e innovadora, y que las dimensiones de proceso artesanal y propiedades sensoriales diferenciadas son las que más valor agregan al producto desde la perspectiva del consumidor urbano [12]. Sánchez-Magaña *et al.* (2025) documentan que precisamente la combinación de identidad cultural, atributo funcional mejorado y perfil sensorial novedoso es el diferenciador central de la "nueva generación de tortillas" con mayor potencial de mercado en México [5].

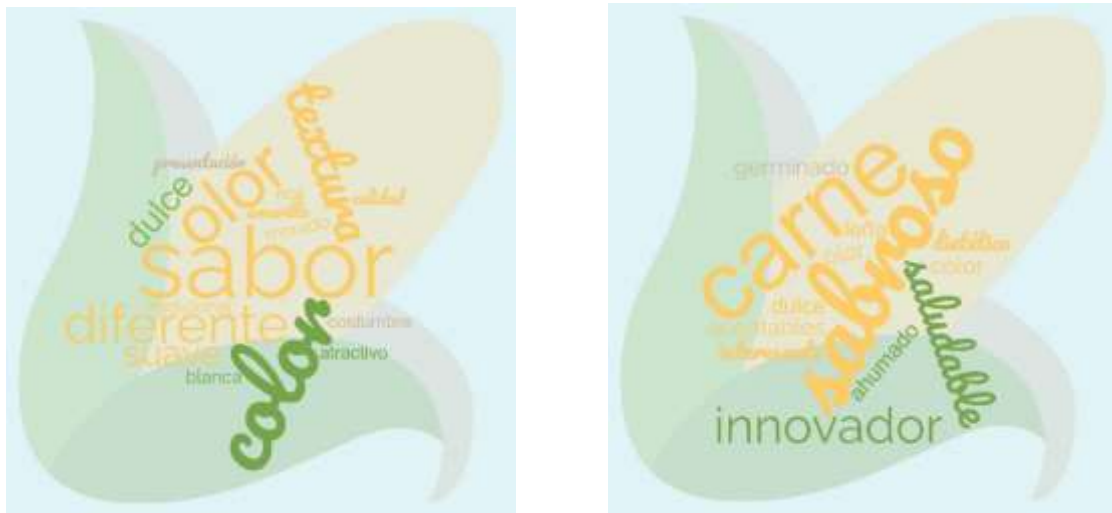


Figura 1. A) Percepción de la población sobre las características que hicieron favorita la tortilla; B) recuerdo que les produce probar las tortillas.

Rendimiento de masa y tortilla

El maíz germinado presentó mayor rendimiento en todas las etapas del proceso. El Morado germinado alcanzó 1,656.7 g de nixtamal frente a 1,439.9 g del mismo tipo sin germinar. El Blanco

olotillo germinado obtuvo 1,651.0 g de masa y 1,293.1 g de tortilla final, frente a 1,436.0 g y 1,014.0 g del Morado sin germinar respectivamente, lo que representa un incremento del 27.5% en el rendimiento final de tortilla (Tabla 1). Este mayor rendimiento se explica por la absorción de agua durante la germinación, que incrementa el peso inicial del grano y favorece la hidratación durante la nixtamalización. Acosta-Estrada *et al.* (2023) confirmaron que las razas nativas presentan en general mayor rendimiento de tortilla por kg de maíz que los híbridos comerciales, atribuido a la estructura de almidón menos compacta y mayor contenido de humedad del nixtamal en las variedades criollas [6]. En todas las etapas se observa una pérdida progresiva de peso conforme el grano avanza en su transformación, siendo la cocción en fogón de leña la etapa con mayor reducción por efecto de la evaporación del agua contenida en la masa. Esta dinámica es inherente al proceso artesanal y deberá considerarse en el diseño de estrategias de producción y fijación de precios para la comercialización del producto en las comunidades de la región.

Tabla 1. Rendimiento comparativo de maíz sin germinar (SG) y germinado (G) en las etapas de nixtamal, masa y tortilla (g).

Maíz sin germinar				
Variedad	Tratamiento	Peso maíz sin nixtamalizar (g)	Peso maíz nixtamalizado (g)	Peso masa húmeda (g)
Blanco olotillo	SG	750	1438.7	1447.3
Amarillo crema	SG	750	1364.60	1387.6
Morado	SG	750	1439.9	1446.0
Maíz germinado				
Variedad	Tratamiento	Peso maíz sin nixtamalizar (g)	Peso maíz nixtamalizado (g)	Peso masa húmeda (g)
Blanco olotillo	G	750	1655.6	1661.0
Amarillo crema	G	750	1560.3	1606.1
Morado	G	750	1656.7	1661.6

Disposición a pagar



Los consumidores expresaron una disposición a pagar de \$25-\$30 MXN/kg para ambos tratamientos, sin diferencia significativa entre ellos. El precio máximo reportado fue levemente superior para las tortillas germinadas (\$50/kg) frente a las sin germinar (\$45/kg), y el precio mínimo idéntico (\$15/kg). Esta similitud indica que los consumidores no perciben la tortilla germinada como un producto de mayor costo, aun cuando el proceso involucra una etapa adicional, lo que resulta favorablemente para su viabilidad económica.

Rodríguez-Álvarez *et al.* (2024) documentaron en Nuevo León que los consumidores de tortillas artesanales de maíz nativo valoran atributos de identidad cultural, salud y calidad sensorial por encima del precio, y que la dimensión de "innovación tradicional" —un producto nuevo que preserva el proceso ancestral— incrementa la disposición a pagar un sobreprecio [12]. La tortilla germinada del presente estudio cumple precisamente con esta caracterización: proceso artesanal en fogón de leña, insumo nativo local y atributo funcional diferenciado por mayor contenido proteico. Nazzaro *et al.* (2024), en un experimento de elección con 445 consumidores italianos sobre alimentos funcionales enriquecidos, encontraron que el precio es el atributo que más afecta la decisión de compra, pero que la presencia del beneficio a la salud genera una disposición a pagar un sobreprecio significativo [13]. En consecuencia, comunicar explícitamente el atributo proteico derivado de la germinación podría elevar la disposición a pagar del rango actual (\$25-\$30/kg) hacia el máximo observado (\$45-\$50/kg), mejorando la rentabilidad del productor sin comprometer la aceptabilidad del consumidor.

Trabajo a futuro

Se recomienda realizar análisis bromatológicos que cuantifiquen el contenido de lisina, triptófano, almidón resistente y compuestos fenólicos en las tortillas elaboradas con cada variedad y tratamiento, a fin de corroborar numéricamente el incremento del valor proteico derivado de la germinación. Se sugiere ampliar el panel sensorial a consumidores de distintos grupos de edad y contextos socioeconómicos —incluyendo personas habituadas a productos fermentados o germinados— e incorporar estrategias de comunicación del beneficio nutricional previas a la degustación para evaluar su efecto sobre la disposición a pagar. Explorar tiempos de germinación alternativos (24, 36 y 72 h) y evaluar la vida útil de las tortillas germinadas bajo distintas condiciones de almacenamiento complementaría la caracterización del producto. Finalmente, el diseño de un análisis de costos de producción orientado a las comunidades productoras de maíz nativo del sureste de Veracruz permitiría estructurar estrategias de comercialización viables para este producto.

Conclusiones

La germinación previa a la nixtamalización mejoró significativamente el sabor ($p=0.0212$) y la suavidad ($p=0.0002$) de las tortillas de maíz nativo, siendo el Blanco olotillo germinado el de mayor aceptación sensorial en ambos indicadores. La mejora en el sabor se explica por la generación de aminoácidos libres y azúcares reductores durante la germinación, que potencian la reacción de Maillard durante el cocimiento y producen compuestos volátiles de perfil aromático complejo —notas a "cereales tostados" y "carne"— valorados como innovadores por los consumidores. Los



atributos de textura, color, presentación y olor no mostraron diferencias significativas, confirmando que la germinación no deteriora las características organolépticas convencionales del producto.

El maíz germinado presentó hasta 27.5% mayor rendimiento en peso final de tortilla, representando una ventaja productiva para los agricultores de la región. La disposición de pago de \$25-\$30/kg — con potencial de incremento si se comunica explícitamente el atributo proteico— confirma la viabilidad económica del producto. El estudio aporta evidencia científica actualizada para orientar estrategias de soberanía alimentaria y conservación de la agrobiodiversidad veracruzana, en consonancia con la tendencia global hacia tortillas funcionales, artesanales y de alto valor nutricional.

Referencias

- [1] CONABIO, "Maíces", Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ciudad de México, México, 2022.
- [2] M. G. Garnica-Romo y H. E. Martínez-Flores, "El maíz y la tortilla: la base de la alimentación del mexicano", *Milenaria, Ciencia y Arte*, No. 24, p. 22-25, 2024. doi: 10.35830/mcya.vi24.536.
- [3] S. M. Hassan, S. F. Forsido, Y. B. Tola y A. M. Bikila, "Physicochemical, nutritional, and sensory properties of tortillas prepared from nixtamalized quality protein maize enriched with soybean", *Applied Food Research*, Vol. 4, Art. 100383, 2024. doi: 10.1016/j.afres.2023.100383.
- [4] A. Félix-Sámamo, M. Sánchez-Velázquez, E. Bucio-Villalobos y col., "Physical, nutritional, and sensory characterization of tortillas formulated with nixtamalized milpa ingredients", *Food Chemistry*, Vol. 470, Art. 142729, 2025. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.142729.
- [5] E. Sánchez-Magaña, D. A. Leal-Gutiérrez y col., "La nueva generación de tortillas: sabor, nutrición y propiedades saludables", *Revista Enfoques CIATEJ*, Vol. 4, No. 2, p. 193-214, 2025.
- [6] B. A. Acosta-Estrada, S. O. Serna-Saldívar y C. Chuck-Hernández, "Nutritional assessment of nixtamalized maize tortillas produced from dry masa flour, landraces, and high yield hybrids and varieties", *Frontiers in Nutrition*, Vol. 10, Art. 1183935, 2023. doi: 10.3389/fnut.2023.1183935.
- [7] G. Palacios-Pola, H. Perales, J. D. Figueroa-Cárdenas, M. Abud-Archila, A. Escalante-Aburto, J. Bolom-Martínez y M. Lagunes-Quevedo, "Functional and sensory properties of toasted tortillas are shaped by structural changes in native maize starch", *Frontiers in Nutrition*, 2025. doi: 10.3389/fnut.2025.1642801.
- [8] M. Gutiérrez-Llanos, I. Alemán-de la Torre, Y. Salinas-Moreno, A. Santillán-Fernández, J. L. Ramírez-Díaz y A. Ledesma-Miramontes, "Color y características nutraceuticas de tortillas de maíces nativos preparadas con diferentes dosis de álcali y refrigeración", *Revista Fitotecnia Mexicana*, Vol. 46, p. 115-126, 2023.



- [9] Y. Salinas-Moreno, L. X. López-Martínez, G. Vázquez-Carrillo y J. L. Ramírez-Díaz, "H-304 R, híbrido de maíz con pigmento para el subtrópico de México", *Revista Fitotecnia Mexicana*, Vol. 48, No. 2, p. 205-208, 2025.
- [10] A. B. Dutra da Silva, G. R. Santos y col., "Maillard Reaction: Mechanism, Influencing Parameters, Advantages, Disadvantages, and Food Industrial Applications: A Review", *Foods*, Vol. 14, No. 11, Art. 1881, 2025. doi: 10.3390/foods14111881.
- [11] M. Villanueva-Pimentel, M. Tapia-Salazar y L. Adame-Rodríguez, "Análisis de tortilla enriquecida para contribuir a la nutrición de consumidores de Pátzcuaro, Michoacán", *VinculaTégica EFAN*, Vol. 10, No. 3, p. 82-99, 2024. doi: 10.29105/vtga10.3-505.
- [12] G. Rodríguez-Álvarez, J. L. Jaramillo-Villanueva y A. M. Vargas-Canales, "Significados de compra y disposición a pagar por tortillas de maíz artesanales en Nuevo León", *Revista Mexicana de Ciencias Agropecuarias*, Vol. 15, No. 2, 2024.
- [13] C. Nazzaro, M. Stanco, A. Uliano y G. Marotta, "Consumers' acceptance and willingness to pay for enriched foods: Evidence from a choice experiment in Italy", *Future Foods*, Vol. 10, Art. 100405, 2024. doi: 10.1016/j.fufo.2024.100405.



Evaluación del crecimiento del forraje verde hidropónico con diferentes concentraciones de fertilizante hidropónico

Lara-Rodríguez D.A.^a, Vázquez-Luna D.^{a*}, Meza-Reyes R.I.^b, Vázquez-Luna M.^c

^a Centro de Estudios Interdisciplinarios en Agrobiodiversidad, Universidad Veracruzana

^b Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria, Universidad Veracruzana

^c Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal

*divazquez@uv.mx

Artículo científico

Resumen—Se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de fertilizante hidropónico sobre el crecimiento del Forraje Verde Hidropónico (FVH) de maíz criollo (*Zea mays* L.) en la localidad de Lázaro Cárdenas, municipio de San Juan Evangelista, Veracruz, durante julio–agosto de 2021. Se probaron cuatro tratamientos: TT (0 g L⁻¹, testigo), T1 (0.75 g L⁻¹), T2 (1.5 g L⁻¹, dosis recomendada) y T3 (3.0 g L⁻¹). Se evaluaron la altura del tapete y la biomasa húmeda diariamente del día 3 al 14, así como rendimiento en biomasa aérea, radicular y seca total a la cosecha. El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones; los datos se analizaron mediante ANOVA y prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). T1 (29 cm) y T2 (28.7 cm) superaron significativamente en altura a TT (22 cm) y T3 (20 cm) al día 14. La mayor biomasa húmeda al día 13 se obtuvo con T2 (230 g). En biomasa seca total, T3 (177 g) fue significativamente inferior al resto (TT=244.3 g, T1=246.3 g, T2=237.3 g), confirmando el efecto fitotóxico del exceso de sales. La dosis recomendada de 1.5 g L⁻¹ optimiza la producción de FVH de maíz criollo en condiciones de trópico húmedo.

Palabras clave: *forraje verde hidropónico; maíz criollo; biomasa; concentración de sales; nutrición mineral.*

Introducción

La producción animal depende críticamente de la disponibilidad y calidad del forraje. En regiones con periodos de sequía prolongados, suelos deteriorados o condiciones climáticas adversas —escenarios cada vez más frecuentes ante el cambio climático global— la oferta de alimento verde se ve comprometida, afectando directamente los índices productivos y reproductivos del hato [1]. Ante este panorama, el Forraje Verde Hidropónico (FVH) surge como una alternativa de producción rápida y de bajo costo: se produce en ciclos de 10 a 15 días, con alta eficiencia en el uso del espacio gracias a la disposición vertical de anaqueles, y con un consumo de agua significativamente menor al de los sistemas convencionales [2]. El FVH presenta excelente valor nutritivo —proteína bruta de 16 a 20%, digestibilidad cercana al 93% y aporte energético de aproximadamente 2.5 Mcal de Energía Metabolizable por kg de materia seca— posicionándolo como un suplemento de alto valor para rumiantes, monogástricos y aves de corral, con especial relevancia para el pequeño productor pecuario [3].

A pesar de su potencial, existe desinformación respecto a la concentración óptima de la solución nutritiva. La literatura reporta una amplia variabilidad en las concentraciones de nutrientes utilizadas en FVH de maíz: los rangos de nitrógeno oscilan desde 5 mg L⁻¹ hasta 238 mg L⁻¹, y los de hierro desde 4.3 mg L⁻¹ hasta 800 mg L⁻¹ [4]. Algunos productores aplican exclusivamente agua, mientras que otros emplean dosis excesivas de fertilizante, afectando tanto la calidad como el rendimiento del forraje [3]. Esta variabilidad evidencia la necesidad de estudios que establezcan

dosis de fertilización adecuadas para las condiciones agroecológicas locales de producción. El objetivo del presente trabajo fue analizar el efecto de cuatro concentraciones de fertilizante hidropónico comercial sobre el crecimiento y la producción de biomasa del FVH de maíz criollo bajo condiciones de trópico húmedo en el sur de Veracruz, México.

Metodología

Sitio de estudio y material vegetal

El experimento se realizó durante julio–agosto de 2021 en la localidad de Lázaro Cárdenas (17°45'44" N, 95°13'49" O), municipio de San Juan Evangelista, Veracruz, en una unidad de producción bajo condiciones de trópico húmedo. Se utilizó semilla de maíz criollo (*Zea mays* L.) a razón de 200 g por unidad experimental. Previo a la siembra, las semillas se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 1% (≤ 30 s) y se pre-germinaron en agua con cal al 10% durante 24 h en dos etapas: 12 h de remojo, 1 h de reposo y 12 h adicionales. La prueba de germinación se realizó con 40 semillas en cajas Petri con algodón húmedo a 28 °C en oscuridad durante 3 días para verificar la viabilidad de la semilla.

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron cuatro concentraciones de fertilizante hidropónico comercial: TT (0 g L⁻¹, testigo), T1 (0.75 g L⁻¹, dosis baja), T2 (1.5 g L⁻¹, dosis recomendada) y T3 (3.0 g L⁻¹, dosis alta). El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones (n=12 unidades experimentales). Los tratamientos se aplicaron mediante riego manual cada 4 horas, usando botellas de un litro por unidad. Durante los dos últimos días del ciclo se eliminó la solución nutritiva y se regó únicamente con agua potable para reducir residuos minerales en el tapete a la cosecha.

Variables medidas y análisis estadístico

Se registraron diariamente la altura total del tapete (cm) —separando parte aérea y radicular— y la biomasa húmeda acumulada (g) desde el día 3 hasta el día 14. A la cosecha se determinó la biomasa aérea, radicular y seca total mediante secado en horno hasta peso constante. Los datos se analizaron con ANOVA de una vía y prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) en el software JASP® v0.10.0.0. Se calculó la correlación lineal de Pearson entre días y variables de crecimiento, y se estimó la relación costo-beneficio por tratamiento considerando los costos fijos de producción del módulo.

Resultados y discusión

Crecimiento en altura: dinámica temporal y respuesta a la concentración de sales

Las curvas de crecimiento en altura mostraron un comportamiento diferencial entre tratamientos a partir del día 6. T1 y T2 describieron funciones de crecimiento lineal con $R^2 \geq 0.98$, sin diferencias entre sí ($p \geq 0.05$), y alcanzaron al día 14 alturas de 29.0 cm y 28.7 cm, respectivamente. Estos valores superaron significativamente ($p < 0.05$) a TT (22.0 cm, $y = 2.07x - 3.36$) y a T3 (20.0 cm, $R^2 = 0.88$). La altura de cosecha óptima para FVH de maíz se reporta entre 20 y 25 cm [3], por lo que T1 y T2 superaron este umbral de manera más eficiente y homogénea que los tratamientos extremos.

La menor altura de TT evidencia que la ausencia de nutrientes minerales limita la elongación celular en los meristemas apicales, posiblemente por deficiencia de nitrógeno disponible para la síntesis de clorofila y proteínas estructurales. En congruencia, López y García (2013) reportaron que tratamientos con fertilizante 12-30-10 y urea alcanzaron alturas de 32.5 cm, mientras que el testigo

solo con agua obtuvo 22 cm, diferencia estadísticamente significativa. Más recientemente, Celi y Torres (2023) encontraron que la aplicación de microorganismos eficientes en FVH de maíz incrementó la absorción de nitrógeno disponible incluso en dosis de fertilización bajas, sugiriendo que la eficiencia del aprovechamiento mineral es tan determinante como la concentración absoluta de la solución nutritiva [3]. García *et al.* (2024) confirman que, bajo un manejo apropiado de la solución nutritiva, el FVH de maíz puede producirse de manera rentable con infraestructura artesanal, como estrategia de seguridad alimentaria para el pequeño ganadero en condiciones tropicales venezolanas, contexto ecológico comparable al del trópico húmedo veracruzano [5].

T3 mostró señales de fitotoxicidad a partir del día 7, con reducción progresiva de la tasa de crecimiento que resultó en la altura final más baja de todos los tratamientos. Este efecto se explica por el doble componente del estrés salino en plantas de maíz: el estrés osmótico —generado por el incremento de la presión osmótica de la solución, que reduce la disponibilidad de agua para las células meristemáticas— y la toxicidad iónica específica por acumulación de iones como Na^+ y Cl^- que interfieren con la absorción de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} [6]. Una revisión reciente sobre tolerancia a sales en maíz (Islam *et al.*, 2024) documenta que el estrés salino desencadena desequilibrios en la homeostasis iónica que reducen la actividad de enzimas antioxidantes y elevan los niveles de malondialdehído (MDA) —indicador de peroxidación lipídica— comprometiendo la integridad de las membranas celulares y la eficiencia fotosintética de las plántulas [6]. Estas respuestas fisiológicas son coherentes con la caída de la tasa de crecimiento observada en T3 a partir del día 7.

Biomasa húmeda acumulada: tasa de acumulación y cinética de crecimiento

T2 registró la mayor tasa de acumulación diaria de biomasa húmeda ($y_{T_2}=17.7x+7.4$, $R^2=0.99$), con un pico de 230.0 g al día 13, significativamente superior a TT (204.3 g) y T1 (188.3 g) ($p<0.05$). T3 ocupó una posición intermedia (212.6 g) sin diferencia significativa respecto a T2, pero con mayor variabilidad entre repeticiones. En el día 14, todos los tratamientos exhibieron una estabilización o ligera reducción del peso húmedo, atribuible a la deshidratación superficial del tapete ante la eliminación de la solución nutritiva en los días finales del ciclo y la temperatura ambiente del trópico.

La mayor biomasa húmeda de T2 respecto a T1, a pesar de que este último alcanzó mayor altura, sugiere que la dosis recomendada de 1.5 g L^{-1} favorece un desarrollo más robusto del tapete en términos de masa tisular, promoviendo mayor densidad radicular y acumulación de agua en los tejidos. Este patrón es consistente con lo reportado por Valdez-Sandoval *et al.* (2022), quienes encontraron producciones de biomasa fresca de FVH de maíz mejorado de entre 150 y 280 g por unidad experimental bajo distintas dosis de fertilización, y señalaron que las dosis moderadas producen tapetes con mejor balance entre producción foliar y densidad radicular [2]. La revisión sistemática de Hydroponic Forage in Ruminant Nutrition (Animals, 2025) —que compiló 28 estudios científicos— señala que el maíz hidropónico exhibe mayor contenido de carbohidratos no estructurales (NSC) y extracto etéreo que la cebada, lo que se traduce en mayor aporte energético por kg de materia fresca cuando la solución nutritiva se aplica en la concentración adecuada; la calidad nutricional del forraje es directamente proporcional al contenido de materia seca a la cosecha [7].

Desde una perspectiva de producción continua, el resultado de T2 (230 g/día 13) en una unidad experimental de 200 g de semilla equivale a una relación de conversión de 1.15 kg de FVH fresco por 100 g de semilla, congruente con los rangos de 5 a 9 kg de forraje por kg de semilla documentados en la literatura para sistemas bien manejados. La implementación de anaqueles

verticales, como los utilizados en este estudio, permite maximizar la producción por metro cuadrado construido; se ha reportado que sistemas artesanales bien diseñados pueden producir hasta 352 kg de forraje fresco por m² de espacio disponible al día, haciendo del FVH una opción altamente eficiente en uso de espacio para unidades de producción familiar [8].

Biomasa seca total: efecto fitotóxico del exceso de sales y calidad nutritiva

En biomasa seca total, T3 (177.0 g) fue el único tratamiento con diferencia significativa respecto a los demás ($p=0.014$), siendo inferior a TT (244.3 g), T1 (246.3 g) y T2 (237.3 g), sin diferencias estadísticas entre estos últimos ($p>0.05$). Este resultado es especialmente relevante porque pone de manifiesto que el exceso de sales reduce no solo el crecimiento visible, sino también la proporción de materia seca —es decir, la concentración de proteínas, carbohidratos estructurales y minerales útiles por unidad de peso fresco del tapete.

El mecanismo subyacente involucra la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en respuesta al estrés iónico y osmótico. Un estudio reciente en maíz bajo condiciones salinas (Frontiers in Plant Science, 2025) documentó que el incremento de la conductividad eléctrica de la solución más allá del umbral de tolerancia activa vías de estrés oxidativo que elevan los niveles de MDA y reducen la eficiencia de la cadena de transporte electrónico fotosintético, disminuyendo la síntesis neta de materia orgánica aun cuando la biomasa húmeda se mantiene por efecto osmótico [9]. Gnanaraj *et al.* (2023) confirmaron en FVH de maíz que las concentraciones de sales por encima del óptimo reducen significativamente la proteína bruta del forraje y la materia seca, mientras que dosis moderadas ejercen un efecto estimulante sobre la síntesis de proteínas estructurales [4]. Los resultados del presente estudio corroboran este patrón: la dosis de 3.0 g L⁻¹ (T3) genera estrés que compromete la acumulación de materia seca sin reducir proporcionalmente la biomasa húmeda, dando un forraje aparentemente abundante pero de menor valor nutritivo real.

En contraste, el comportamiento de TT (244.3 g de biomasa seca) demuestra que las reservas del cotiledón de la semilla de maíz criollo son suficientes para sostener un crecimiento inicial significativo sin solución nutritiva externa. Sin embargo, las plántulas del tratamiento testigo mostraron menor altura y menor homogeneidad del tapete, características que a largo plazo —y especialmente en ciclos de producción consecutivos con densidades de siembra más altas— podrían comprometer la productividad total del sistema. Este resultado coincide con lo reportado por Vargas (2008) sobre el efecto positivo de las soluciones nutritivas en la calidad proteica del FVH de maíz. Un estudio comparativo reciente (InnsPub, 2024) que analizó la composición química de forraje hidropónico, grano y forraje convencional de maíz confirmó que el FVH con solución nutritiva adecuada supera al forraje convencional en proteína cruda, extracto etéreo y cenizas, con una ventaja que se pierde cuando la concentración de sales es excesiva [10].

Perspectiva global: tendencias recientes en investigación y aplicación del FVH

La revisión sistemática publicada en Animals (2025), que analizó 28 estudios sobre forraje hidropónico en la nutrición de rumiantes, documenta un crecimiento notable en la investigación del FVH: en 2024 se publicaron al menos 10 artículos científicos sobre el tema, el mayor número en la historia de esta línea de investigación, con una tendencia al alza que continúa en 2025 [7]. Este auge refleja el creciente interés mundial por sistemas de producción de forraje más resilientes al clima, seguros hídrica y territorialmente, y accesibles para el pequeño ganadero. La revisión concluye que el FVH de maíz mejora la calidad de la leche, la tasa de crecimiento y la eficiencia alimenticia en

rumiantes, atributos directamente vinculados a la calidad nutricional del forraje a la cosecha, que a su vez depende de la concentración adecuada de la solución nutritiva [7].

Desde la perspectiva de sostenibilidad y alimentación animal, un análisis de costo-beneficio sobre forraje hidropónico publicado por el PNUD en 2025 para contextos de pequeña escala documentó que el costo promedio del FVH es significativamente inferior al de los concentrados comerciales; combinado con forraje convencional, el FVH puede reducir los costos de alimentación animal hasta en un 60%, mejorando la rentabilidad de las explotaciones familiares [8]. El presente estudio, ubicado en una unidad de producción de pequeña escala en el trópico húmedo veracruzano, es coherente con este marco: los costos fijos estimados de \$112-\$146 MXN por ciclo de producción del módulo resultan competitivos frente al precio de concentrado comercial con 19-24% de proteína (\$7-\$8 MXN/kg), especialmente considerando que el FVH de maíz con dosis adecuada de fertilizante puede alcanzar contenidos proteicos de 12.28%, superiores a los del Pasto Napier convencional (7.22%) y otros pastos tropicales de la región [7].

García *et al.* (2024), en el contexto del trópico venezolano —ecológicamente similar al sur de Veracruz en cuanto a temperatura, humedad y disponibilidad de maíz criollo— documentaron que el FVH producido en módulos artesanales de bajo costo constituye una estrategia viable para garantizar el suministro de forraje verde durante todo el año, independientemente de la estacionalidad, y recomiendan su adopción masiva por parte de pequeños productores como complemento al pastoreo extensivo [5]. Los resultados del presente trabajo apoyan esta recomendación y aportan evidencia específica sobre la dosis de fertilización óptima para maíz criollo bajo condiciones de trópico húmedo.

Análisis costo-beneficio

El análisis económico consideró costos fijos totales de \$112 MXN por ciclo para un anaquel individual (salarios \$51, suministros \$33, depreciación \$28) y de \$146 MXN para el módulo completo de seis anaqueles. A un precio de referencia de \$6.00 MXN/kg de FVH —comparable al concentrado comercial de 19-24% de proteína a \$7-8 MXN/kg— se calculó la relación beneficio/costo para cada tratamiento (Tabla 2). T1 obtuvo la mayor rentabilidad de anaquel individual (B/C=1.37), seguido de TT (B/C=1.31), T3 (B/C=1.03) y T2 (B/C=0.98). Al escalar al módulo completo, T1 mantuvo la mayor rentabilidad (B/C=6.31), seguido de TT (B/C=6.05), T3 (B/C=4.75) y T2 (B/C=4.51).

Tabla 1. Análisis de costo-beneficio por tratamiento (anaquel individual).

Tratam.	Descripción	Producción (kg/anaquel)	Ingreso (\$6/kg)	Costo (\$)	B/C (anaquel)
T1	0.75 g L ⁻¹	25.55	153.32	112	1.37
T2	1.5 g L ⁻¹	18.26	109.53	112	0.98
T3	3.0 g L ⁻¹	19.23	115.37	112	1.03
TT	0 g L ⁻¹	24.50	147.01	112	1.31

La aparente contradicción entre la superioridad agronómica de T2 en biomasa húmeda y su menor relación B/C se explica porque T1 produjo mayor peso fresco total por anaquel, a pesar de que la biomasa húmeda diaria máxima de T2 fue superior. Desde una perspectiva de manejo integrado, la elección del tratamiento óptimo depende del objetivo prioritario del productor: si la meta es maximizar la calidad nutritiva expresada en materia seca y densidad proteica, T2 es la opción más adecuada; si el objetivo es la relación beneficio/costo a corto plazo, T1 ofrece mayor rentabilidad [2,3]. Para sistemas de producción semi-intensivos orientados a pequeños productores del trópico veracruzano, T2 sigue siendo recomendable por su mayor estabilidad, menor variabilidad entre repeticiones y mejor perfil nutricional proyectado, elementos que determinan la viabilidad del sistema a mediano plazo.

Tabla 2. Resultados por tratamiento al final del ciclo (día 14). Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Tratamiento	Descripción	Altura día 14 (cm)	Biomasa húmeda día 13 (g)	Biomasa seca total (g)
TT	0 g L ⁻¹ (testigo)	22.0 b	204.3 b	244.3 a
T1	0.75 g L ⁻¹ (dosis baja)	29.0 a	188.3 b	246.3 a
T2	1.5 g L ⁻¹ (dosis recomendada)	28.7 a	230.0 a	237.3 a
T3	3.0 g L ⁻¹ (dosis alta)	20.0 b	212.6 ab	177.0 b

^{ab} Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Trabajo a futuro

Se recomienda incluir el análisis bromatológico completo del FVH cosechado — proteína bruta, FDN, FDA, cenizas y extracto etéreo— para correlacionar directamente la concentración de fertilizante con la calidad nutritiva real y complementar el análisis agronómico del presente trabajo. En línea con las recomendaciones más recientes de la literatura (Animals, 2025), es pertinente diseñar pruebas de palatabilidad y consumo voluntario con bovinos, ovinos y aves de la región, así como evaluar indicadores de desempeño animal (ganancia de peso, producción y calidad de leche) bajo dietas que incluyan FVH producido con T2, a fin de cuantificar el impacto productivo y económico real a nivel de unidad de producción. Asimismo, explorar el efecto de frecuencias de riego variables (cada 2, 4 y 6 horas) sobre el crecimiento de T1 y T2 bajo las temperaturas del trópico húmedo veracruzano contribuiría a optimizar el manejo del sistema. Finalmente, un análisis de ciclo de vida del módulo artesanal de producción de FVH cuantificaría la huella hídrica y la viabilidad ambiental del sistema como estrategia de adaptación al cambio climático en la ganadería regional del sureste de Veracruz.

Conclusiones

La concentración de fertilizante hidropónico tuvo un efecto significativo sobre el crecimiento y la productividad del FVH de maíz criollo bajo condiciones de trópico húmedo en Veracruz. T1 (0.75 g L⁻¹) y T2 (1.5 g L⁻¹) superaron significativamente a TT y T3 en altura al día 14, demostrando que tanto



la deficiencia como el exceso de sales inhiben el crecimiento longitudinal del tapete a través de mecanismos de estrés osmótico e iónico.

T2 produjo la mayor biomasa húmeda acumulada (230 g al día 13, $R^2=0.99$), mientras que T3 presentó la menor biomasa seca total (177 g, $p=0.014$), confirmando su efecto fitotóxico sobre la acumulación de materia orgánica. No se encontraron diferencias significativas en biomasa seca entre TT, T1 y T2. En términos económicos, T1 presentó la mayor relación beneficio/costo tanto por anaquel individual ($B/C=1.37$) como por módulo completo ($B/C=6.31$).

Se concluye que la dosis recomendada de 1.5 g L^{-1} es la óptima para maximizar la producción de biomasa húmeda de alta calidad potencial, mientras que 0.75 g L^{-1} ofrece mayor rentabilidad económica a corto plazo. El FVH de maíz criollo representa una alternativa viable, económicamente rentable y agroecológicamente pertinente para la alimentación animal en unidades de producción de pequeña escala del trópico húmedo veracruzano, en consonancia con las tendencias globales de resiliencia alimentaria documentadas en la literatura científica reciente.

Referencias

- [1] H. Ghasemi-Mobtaker, M. Sharifi, N. Taherzadeh-Shalmai y S. Afrasiabi, "A new method for green forage production: Energy use efficiency and environmental sustainability", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 363, Art. 132562, 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132562.
- [2] C. Valdez-Sandoval, M. Díaz-Rodríguez, D. Guerra-Centeno, C. Noriega-Morales y H. Pérez-Noriega, "Producción de biomasa de forraje verde hidropónico de cinco variedades mejoradas de maíz producidas por el ICTA de Guatemala", *Revista Científica del Sistema de Estudios de Postgrado de la Universidad de San Carlos de Guatemala*, Vol. 5, No. 2, p. 21-34, 2022. doi: 10.36958/sep.v5i2.116.
- [3] K. Celi y T. Torres, "Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) con aplicación de microorganismos eficientes en la ciudad de Quindé", *Revista Criterios*, Vol. 30, No. 2, p. 43-50, 2023.
- [4] P. T. Gnanaraj, S. Gunasekaran, C. Valli, R. Karunakaran y H. Gopi, "Growth Potential of Hydroponic Maize and Horse Gram with customized Nutrient Supplements for Climate Resilient Fodder Production", *Biological Forum – An International Journal*, Vol. 15, No. 8a, p. 359-364, 2023.
- [5] H. García, L. Ure, A. Márquez y F. Lugo, "Producción de forraje verde hidropónico a base de maíz. Una estrategia para los pequeños productores", *INIA Divulga*, Vol. 30, No. 30, p. 23-27, 2024.
- [6] M. S. Islam, M. R. Islam, M. K. Hasan y A. S. M. G. Hafeez, "Salinity Stress in Maize: Consequences, Tolerance Mechanisms, and Management Strategies", *OBM Genetics*, 2024. doi: 10.21926/obm.genet.2402232.
- [7] A. Bava, L. Rapetti, G. Gislón y M. Crovetto, "Hydroponic Forage in Ruminant Nutrition: A Systematic Review of Nutritional Value, Performance Outcomes, and Sustainability", *Animals*, Vol. 15, Art. 3544, 2025. doi: 10.3390/ani15243544.
- [8] PNUD, "Cost-Benefit Analysis of Hydroponic Fodder", United Nations Development Programme, Rwanda, 2025.



- [9] Z. Zhao, Y. Li, X. Wang, S. Chen y Q. Huang, "A sustainable fertilization strategy to boost maize yield and photosynthetic resilience in saline soils", *Frontiers in Plant Science*, 2025. doi: 10.3389/fpls.2025.1587533.
- [10] P. Martínez, C. Ramos y E. García, "Assessment of nutrient content in grain, hydroponic and conventional fodder with focus on maize, wheat and Sudan grass", *Innovative Publication*, 2024.
- [11] R. Maldonado Torres, M. Álvarez Sánchez, D. C. Acevedo y E. Ríos Sánchez, "Nutrición mineral de forraje verde hidropónico", *Revista Chapingo. Serie horticultura*, Vol. 19, p. 211-223, 2013.
- [12] MANUAL TÉCNICO FAO, Forraje verde hidropónico, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile, 2002.



El ganado criollo un reservorio de genética funcional

L. M. Morales-Crispín^{1*}, E. J. Molina-González¹, E. J. Ramón-Hernández¹, B. M. Rivadeneyra-Cabañas¹, P. Reyes-Cespedes¹.

¹Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria, Universidad Veracruzana; Carretera Costera del Golfo km 220, Col. Agrícola Michapan, Acayucan, Veracruz, México, C.P. 96100.

[*luismorales03@uv.mx](mailto:luismorales03@uv.mx) autor correspondiente

Resumen— El ganado criollo representa un recurso zoogenético estratégico debido a su elevada adaptación a condiciones ambientales adversas, eficiencia reproductiva y resistencia a enfermedades. Sin embargo, los programas de mejoramiento genético han priorizado caracteres productivos, reduciendo la variabilidad genética y descuidando atributos funcionales esenciales. En este contexto, la selección basada en eficiencia funcional y en el conocimiento de genes asociados a adaptación, como aquellos relacionados con tolerancia al estrés térmico, inmunidad y calidad de productos, permite optimizar la productividad sin comprometer la resiliencia de los sistemas. Evidencias reportadas destacan el papel de alelos específicos en resistencia a enfermedades y en características productivas de carne y leche. Ante el cambio climático, el ganado criollo se posiciona como un reservorio clave de genes adaptativos, fundamental para el desarrollo de sistemas ganaderos sostenibles, eficientes y resilientes en el trópico.

Introducción

El ganado bovino fue introducido al continente americano durante el periodo de la colonización, adaptándose progresivamente a diversos ambientes, particularmente en regiones tropicales y subtropicales, donde desarrolló características propias derivadas de procesos de selección natural y manejo tradicional (Martínez et al., 2000; Hoogesteijn et al., 2016). A partir de este proceso evolutivo surgen los bovinos criollos, definidos como poblaciones descendientes de los primeros animales introducidos, que han logrado una alta adaptación a condiciones ambientales adversas, constituyéndose en un recurso zoogenético de gran valor (Escobar, 2014).

Estas poblaciones se distinguen por su rusticidad, eficiencia reproductiva, tolerancia al estrés ambiental y resistencia a enfermedades y parásitos, atributos que les permiten mantener niveles productivos aceptables bajo sistemas extensivos y de bajos insumos (Torres-Rodríguez et al., 2015; Ossa et al., 2011). Además, su capacidad de adaptación al entorno ecológico y su diversidad genética los posicionan como un componente esencial para el desarrollo de sistemas ganaderos sostenibles (Ossa et al., 2011). En contraste, los sistemas de mejoramiento genético convencionales han privilegiado características productivas específicas, lo que ha reducido la variabilidad genética y, en algunos casos, la capacidad adaptativa de las poblaciones mejoradas (Torres-Rodríguez et al., 2015).

En este contexto, la revalorización del ganado criollo como fuente de genes asociados a adaptación, resistencia y eficiencia funcional resulta fundamental para enfrentar los desafíos actuales de la ganadería, especialmente aquellos derivados del cambio climático y de la intensificación productiva. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es analizar y sintetizar la evidencia científica sobre las características funcionales y genéticas del ganado criollo, destacando su papel como reservorio de genética funcional, para el desarrollo de sistemas de producción bovina sostenibles y resilientes.

Metodología

El presente trabajo se desarrolló bajo un enfoque de revisión documental de carácter descriptivo, orientado a la síntesis y análisis de información científica relacionada con el ganado bovino criollo como reservorio de genética funcional. Para ello, se recopilaron y seleccionaron estudios publicados en artículos científicos, tesis y literatura técnica especializada que abordan aspectos de adaptación, eficiencia funcional, resistencia a enfermedades y características productivas en estas poblaciones.

La información fue organizada por ejes temáticos: eficiencia funcional, características de adaptación, bases genéticas de respuesta al estrés, genes asociados a resistencia sanitaria y genes vinculados con parámetros productivos. Posteriormente, se realizó un proceso de análisis comparativo e integración de los hallazgos, priorizando aquellos que aportan evidencia relevante sobre el valor del ganado criollo en sistemas de producción tropical.

Eficiencia funcional y su importancia en el ganado Criollo

La eficiencia funcional (EF) se define como la capacidad de un animal para expresar su potencial productivo de manera sostenida en el tiempo, manteniendo equilibrio entre producción, reproducción, salud y adaptación al entorno. Este enfoque reconoce que la productividad no depende únicamente del rendimiento en carne o leche, sino de la integración de múltiples caracteres fisiológicos y estructurales que garantizan la permanencia y eficiencia del animal en el sistema productivo (Bonsma, 1999; Rojas, 1990).

En este contexto, el ganado criollo destaca por presentar una elevada eficiencia funcional, resultado de procesos prolongados de adaptación natural a condiciones ambientales restrictivas. Estos animales han desarrollado mecanismos que favorecen la fertilidad, la longevidad productiva y la resistencia a factores de estrés, lo que les permite mantener ciclos reproductivos estables y una adecuada productividad bajo sistemas extensivos y de bajos insumos (Bavera & Peñafort, 2005; Chirinos, 2011). Esta condición los posiciona como modelos biológicos eficientes en ecosistemas tropicales, donde las razas altamente especializadas suelen presentar limitaciones adaptativas.

La selección basada en eficiencia funcional implica evaluar características externas asociadas con el desempeño fisiológico interno, incluyendo conformación corporal, características sexuales secundarias y expresión del sistema endocrino, elementos que reflejan el estado metabólico y reproductivo del animal (Bavera & Peñafort, 2005). A diferencia de los enfoques tradicionales centrados exclusivamente en producción, este criterio permite identificar individuos capaces de mantener altos niveles de desempeño en condiciones variables, contribuyendo a la estabilidad y sostenibilidad del sistema.

En sistemas de producción bovina tropical, la integración de la eficiencia funcional como criterio de selección cobra especial relevancia, ya que permite optimizar la productividad sin comprometer la resiliencia del sistema. En este sentido, el ganado criollo representa un recurso estratégico, al combinar atributos productivos con adaptación ambiental, lo que favorece su utilización en programas de mejoramiento genético orientados hacia la sostenibilidad y la respuesta a condiciones de cambio climático.

Características del ganado Criollo y bases de adaptación

El ganado criollo presenta un conjunto de características fenotípicas y fisiológicas que reflejan su prolongado proceso de adaptación a condiciones ambientales adversas, particularmente en regiones tropicales. Entre estas destacan la presencia de pelo corto, fino y brillante, piel pigmentada y de mayor espesor, así como estructuras corporales que favorecen la disipación de calor. Estas características morfológicas están directamente relacionadas con la capacidad del animal para mantener su homeostasis térmica en ambientes de alta radiación solar y temperaturas elevadas (Chirinos et al., 2011; Cevallos-Falquez et al., 2016).

Desde el punto de vista productivo y sanitario, el ganado criollo se distingue por su alta capacidad de aprovechamiento de forrajes, eficiencia reproductiva y resistencia a ectoparásitos y enfermedades. Estas cualidades le permiten sostener niveles productivos estables en sistemas extensivos con limitaciones nutricionales y sanitarias, lo que representa una ventaja comparativa frente a razas especializadas bajo condiciones tropicales (Alba & Carrera, 1958; Villar, 1992). La resistencia a infestaciones parasitarias se ha asociado tanto a mecanismos inmunológicos como a características de la piel y el pelaje, que dificultan el establecimiento de ectoparásitos.

La base de estas características adaptativas se encuentra en la interacción entre factores genéticos y ambientales que han favorecido la selección natural de individuos mejor adaptados. En este sentido, el ganado criollo funciona como un reservorio de variabilidad genética, en el que se conservan alelos asociados a procesos de termorregulación, respuesta inmunitaria y eficiencia metabólica. Esta variabilidad permite a estas poblaciones responder de manera efectiva a cambios ambientales y presiones productivas, consolidando su papel en la sostenibilidad de los sistemas ganaderos (Ossa et al., 2011).

Ante el escenario actual de cambio climático, caracterizado por el incremento de la temperatura ambiental y la mayor incidencia de factores de estrés, las características adaptativas del ganado criollo adquieren una relevancia estratégica. Su capacidad para mantener el equilibrio productivo en condiciones adversas lo posiciona como un recurso clave para el desarrollo de programas de mejoramiento genético orientados a la resiliencia, donde la integración de genes adaptativos permitirá optimizar la producción sin comprometer la estabilidad de los sistemas bovinos en el trópico.

Bases genéticas de adaptación

La adaptación del ganado criollo a condiciones ambientales adversas tiene un fundamento genético que se expresa a través de mecanismos fisiológicos y moleculares asociados a la termorregulación, el metabolismo y la respuesta inmunitaria. Estos animales han desarrollado una arquitectura genética que les permite responder de manera eficiente a factores de estrés, particularmente al estrés térmico, el cual representa uno de los principales limitantes en los sistemas de producción tropical (Collier et al., 2008; Pereira et al., 2023).

Entre los principales elementos genéticos asociados a la adaptación destaca el gen *SLICK*, el cual se ha vinculado con la presencia de pelo corto, fino y brillante, característica que favorece la disipación del calor mediante mecanismos como la convección, conducción e irradiación. Este rasgo morfológico reduce la carga térmica corporal, permitiendo a los animales mantener una

temperatura interna más estable en ambientes cálidos (Ortiz-Uriarte et al., 2020; Ostos, 2023). Asimismo, la presencia de este gen en poblaciones criollas refuerza su valor como fuente de alelos adaptativos en programas de mejoramiento genético orientados a la tolerancia al calor.

Adicionalmente, la respuesta al estrés térmico involucra la activación de redes genéticas que regulan la expresión de proteínas de choque térmico, el metabolismo energético y la actividad del sistema endocrino. Estos procesos permiten al animal ajustar su funcionamiento fisiológico ante condiciones extremas, facilitando su aclimatación y reduciendo los efectos negativos del ambiente sobre la productividad (Collier et al., 2008).

En conjunto, estas bases genéticas explican la capacidad del ganado criollo para mantener su desempeño productivo en condiciones restrictivas, consolidándolo como un recurso estratégico para la ganadería del futuro. La identificación y utilización de estos genes en programas de mejoramiento permitirán desarrollar animales con mayor resiliencia, capaces de enfrentar los desafíos impuestos por el cambio climático sin comprometer la eficiencia productiva.

Genes de resistencia a enfermedades y parásitos

El ganado criollo presenta una notable capacidad de resistencia a enfermedades infecciosas y parasitarias, atribuida en gran medida a su diversidad genética y a la presencia de alelos específicos asociados con la respuesta inmunitaria. Entre los sistemas más estudiados destaca el complejo mayor de histocompatibilidad bovino (BoLA), particularmente el locus *BoLA-DRB3*, que ha sido relacionado con la resistencia o susceptibilidad a diversas enfermedades de importancia productiva (Bethancourt & Toribio, 2013).

Diversos estudios han evidenciado asociaciones entre variantes alélicas del gen *BoLA-DRB3* y la resistencia a hemoparásitos como *Babesia bovis* y *Babesia bigemina*, así como a enfermedades virales como la leucosis bovina. En razas criollas, se ha identificado una mayor frecuencia de alelos asociados a resistencia, lo que sugiere una ventaja adaptativa frente a poblaciones comerciales o altamente seleccionadas (Bolaños et al., 2017; Hernández et al., 2014). Asimismo, se ha observado una menor prevalencia relativa de ciertas enfermedades en poblaciones criollas, lo que refuerza la importancia de estos recursos genéticos en programas de sanidad y mejoramiento.

En el caso del ganado criollo mexicano, la identificación de nuevos alelos del sistema *BoLA-DRB3* ha puesto en evidencia una mayor variabilidad genética, lo que podría traducirse en una capacidad ampliada de respuesta frente a una diversidad de agentes patógenos (Portillo et al., 2006). Esta condición es especialmente relevante en sistemas tropicales, donde la presión parasitaria y la incidencia de enfermedades representan limitantes constantes para la producción.

En conjunto, estos hallazgos confirman que el ganado criollo constituye una reserva genética fundamental para la resistencia a enfermedades, lo que lo convierte en un recurso estratégico para el desarrollo de programas de mejoramiento genético y sanidad animal. La incorporación de estos genes en esquemas productivos permitirá reducir la dependencia de tratamientos farmacológicos, mejorar el bienestar animal y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas bovinos en condiciones tropicales.



Genes asociados a parámetros productivos

El ganado criollo no solo destaca por su adaptación y resistencia, sino también por poseer variantes genéticas asociadas a la calidad y eficiencia de la producción de leche y carne. Diversos estudios han identificado polimorfismos en genes de proteínas lácteas, como la k-caseína (*CSN3*) y la beta-lactoglobulina (*BLG*), los cuales influyen significativamente en la composición de la leche y en el rendimiento quesero. En particular, la presencia de variantes alélicas favorables ha sido asociada con mayores concentraciones de proteína, grasa y sólidos totales, lo que incrementa el valor tecnológico de la leche en sistemas de producción (Rojas et al., 2009; Rojas et al., 2010).

Adicionalmente, la interacción entre estos genes y sus haplotipos ha demostrado efectos relevantes tanto en la cantidad como en la calidad de la leche producida, lo que permite orientar programas de selección hacia la mejora integral del producto, manteniendo al mismo tiempo la variabilidad genética de las poblaciones criollas (Rojas et al., 2011). Este hecho es particularmente importante en sistemas de pequeña y mediana escala, donde la calidad del producto puede representar una ventaja competitiva frente a modelos intensivos basados únicamente en volumen.

En el caso de la producción de carne, genes como la calpaína (*CAPN*) y la calpastatina (*CAST*) han sido relacionados con características de calidad, especialmente la terneza. La identificación de genotipos favorables en estas regiones permite mejorar atributos del producto final mediante selección asistida por marcadores, optimizando la calidad sin comprometer la adaptación de los animales (Torres-Rodríguez et al., 2015).

En conjunto, la evidencia indica que el ganado criollo posee un potencial productivo sustentado en bases genéticas que favorecen la calidad de sus productos. La integración de esta información en programas de mejoramiento genético permitirá aprovechar de manera más eficiente estos recursos, equilibrando productividad, calidad y adaptación en sistemas bovinos sostenibles.

Conclusiones

La selección de bovinos en criterios de eficiencia funcional permite integrar productividad, reproducción, salud y adaptación dentro de un mismo enfoque, favoreciendo sistemas de producción más estables y sostenibles. En este sentido, el ganado criollo representa un recurso zoogenético de alto valor, al conservar una amplia variabilidad genética asociada con características de adaptación, resistencia y desempeño productivo en condiciones ambientales restrictivas. La evidencia confirma que estas poblaciones poseen genes relacionados con la tolerancia al estrés térmico, la respuesta inmunitaria y la calidad de productos, lo que posiciona como una fuente estratégica para programas de mejoramiento genético. Frente a los desafíos actuales derivados del cambio climático y de la intensificación productiva, la incorporación de estos recursos genéticos permite desarrollar sistemas bovinos más resilientes, eficientes y sostenibles. En consecuencia, la conservación, caracterización y utilización del ganado criollo no solo es una necesidad científica, sino una estrategia clave para garantizar la competitividad y viabilidad futura de la producción bovina en el trópico.



Referencias

- Alba, J. de, & Carrera, C. (1958). Selección del ganado criollo lechero tropical. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), Departamento de Industria Animal, Turrialba, Costa Rica.
- Bavera, G. A., & Peñafort, C. H. (2005). Evaluación exterior de los signos de fertilidad y subfertilidad de un rodeo. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Bethancourt, H., & Toribio, B. (2013). Caracterización genética del ganado Criollo Lechero Dominicano utilizando microsatélites. *APF*, 2(1), 43–48.
- Bolaños, I., Hernández, D., & Álvarez, L. (2017). Asociación de los alelos del gen BoLA-DRB3 con la infección natural de *Babesia* spp. en el ganado criollo Hartón del Valle. *Archivos de Zootecnia*, 66(253), 113–120.
- Bonsma, D. J. (1999). Beef breeding in South Africa (Animal Improvement Institute). Agricultural Research Council.
- Cevallos-Falquez, O., Barba, C., Delgado, J. V., González, A., Perea, J., Angón, E., & García, A. (2016). Caracterización zoométrica y morfológica del ganado criollo de Manabí (Ecuador). *Revista Científica*, 26(5), 313–323.
- Chirinos, Z. (2011). La funcionalidad animal: herramienta esencial para la mejora del rebaño bovino. En *Innovación y tecnología en ganadería doble propósito* (capítulo de libro).
- Chirinos, Z., Contreras, G., Zambrano, S., Molero, E., & Páez, A. (2011). Caracterización del dimorfismo sexual en ganado criollo limonero mediante medidas corporales. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 28(1), 554–564.
- Collier, R. J., Collier, J. L., Rhoads, R. P., & Baumgard, L. H. (2008). Invited review: Genes involved in the bovine heat stress response. *Journal of Dairy Science*, 91(2), 445–454.
- Escobar, D. C. (2014). Medidas zoométricas del ganado bovino criollo de Panamá. *Investigación y Pensamiento Crítico*, 2(5), 26–33.
- Hernández, H. D. Y., Muñoz, F. J. E., & Álvarez, L. A. (2014). Asociación del locus BoLA-DRB3.2 con el virus de la leucosis bovina en ganado criollo colombiano. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 6(2), 319–326.
- Hoogesteijn, R., Payán, E., Valderrama-Vásquez, C., Tortato, F., & Hoogesteijn, A. L. (2016). Comportamiento del ganado criollo Sanmartinero y Pantaneiro. En *Conflictos entre felinos y humanos en América Latina* (pp. 193–210). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Martínez, R. D., Fernández, E. N., Género, E. R., & Rumiano, F. J. L. (2000). El ganado bovino criollo en Argentina. *Archivos de Zootecnia*, 49(187), 353–361.
- Ortiz-Urriarte, B., Rosa-Padilla, N., López-López, R., Curbelo-Rodríguez, J., Negrón-Pérez, V. M., & Ortiz-Colón, G. (2020). Comparison of milk production and calving intervals between slick and wild-type bovines in tropical grazing systems. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 28(3–4), 145–153.
- Ossa, G., Abuabara, Y., García, J. P., & Martínez, G. (2011). El ganado criollo colombiano Costeño con Cuernos (CCC). *Animal Genetic Resources*, 48, 101–107.
- Ostos, T. M. K. (2023). Reseña del gen SLICK en bovinos criollos tropicales (Tesis de licenciatura). Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas.
- Pereira, J. A., Loza, A., Méndez, F., & Sandoval, Y. (2023). Determinación de la frecuencia alélica del gen Slick en bovinos criollos Yacumeños. En *Memorias de la XXIII Reunión Nacional ABOPA*.
- Portillo, M. F., Ramírez, J. G. R., de la Vega, G. E. E., & Almeida, F. R. (2006). Secuenciación de nuevos alelos BoLA-DRB3.2 detectados en ganado criollo mexicano. *Técnica Pecuaria en México*, 44(1), 15–25.



- Rojas, I. (1990). Selección funcional en bovinos y su relación con la productividad. Documento técnico.
- Rojas, I., Aranguren-Méndez, J., Portillo, M., Rincón, X., Martínez, G., & Contreras, G. (2011). Efecto del polimorfismo genético de proteínas lácteas sobre la producción y composición de la leche en ganado criollo limonero. *Revista Científica*, 21(6), 517–523.
- Rojas, I., Aranguren-Méndez, J., Portillo, M., Villasmil-Ontiveros, Y., Valbuena, E., Rincón, X., & Yáñez, L. (2009). Polimorfismo genético de la kappa-caseína en ganado criollo limonero. *Revista Científica*, 19(6), 645–649.
- Rojas, I., Aranguren-Méndez, J., Portillo, M., Villasmil-Ontiveros, Y., Rincón, X., & Contreras, G. (2010). Frecuencias alélicas de beta-lactoglobulina en ganado criollo limonero. *Revista Científica*, 20(2), 176–180.
- Torres-Rodríguez, P. V., Aranguren-Méndez, J. A., Portillo-Ríos, M. G., Rojas, I. M., & Chango-Oduber, R. (2015). Estudio de polimorfismos y su relación con características productivas en ganado criollo limonero. *Revista Científica*, 25(3), 232–238.
- Villar Cléves, C. E. (1992). Resistencia a ectoparásitos de los bovinos en el trópico. En *Memorias del Seminario Nacional de Producción Bovina Tropical* (pp. 149–159). Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Villavicencio, Colombia.



Estrategia fitoterapéutica con *tithonia diversifolia* y *canavalia ensiformis* para el control endoparasitario en ovinos de pelo

Y. López-Madrigal¹, L. M. Morales-Crispín^{1*}, B. Martínez-Candelario¹, A. Celestino-Caballero¹, A. Luna-Aguilar¹.

¹Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria, Universidad Veracruzana; Carretera Costera del Golfo km 220, Col. Agrícola Michapan, Acayucan, Veracruz, México, C.P. 96100.

[*luismorales03@uv.mx](mailto:luismorales03@uv.mx) autor correspondiente

Resumen— El parasitismo gastrointestinal limita la productividad de los ovinos de pelo en sistemas de pastoreo, agravado por la creciente resistencia a antihelmínticos químicos. En este contexto, la fitoterapia basada en plantas con metabolitos secundarios representa una alternativa viable. *Tithonia diversifolia* y *Canavalia ensiformis* contienen compuestos como taninos condensados, flavonoides y saponinas con potencial antihelmíntico. El objetivo de este artículo es analizar la evidencia científica sobre sus mecanismos de acción, eficacia y aplicabilidad en campo para el control endoparasitario en ovinos de pelo. Se realizó una revisión de literatura científica validada, priorizando estudios con evidencia experimental y revisiones especializadas. La evidencia sugiere que estas especies pueden reducir la carga parasitaria y mejorar indicadores productivos cuando se utilizan bajo esquemas controlados. Sin embargo, su efectividad depende de factores como dosis, estado fenológico y manejo nutricional, por lo que su implementación debe integrarse en estrategias sanitarias complementarias adaptadas a condiciones de campo.

Introducción

El parasitismo gastrointestinal constituye una de las principales limitantes en la producción de ovinos de pelo en sistemas extensivos, generando pérdidas económicas asociadas con disminución en la ganancia de peso, baja eficiencia alimenticia y aumento en la mortalidad, especialmente en condiciones tropicales (Kaplan, 2004; Waller, 2006). La alta prevalencia de nematodos como *Haemonchus contortus* ha sido ampliamente documentada, destacando su impacto sobre indicadores productivos y sanitarios en pequeños rumiantes (Besier & Love, 2003; Geurden et al., 2014). Además, factores como la temperatura y humedad favorecen la persistencia de estadios infectivos en el ambiente, dificultando el control bajo esquemas tradicionales (Kaplan & Vidyashankar, 2012; Waller, 2006).

El uso intensivo de antihelmínticos sintéticos ha derivado en el desarrollo de resistencia parasitaria, fenómeno ampliamente reportado a nivel mundial, lo que compromete la eficacia de los programas de control y obliga a replantear estrategias sanitarias sostenibles (Kaplan, 2004; Besier & Love, 2003). Esta problemática ha impulsado la búsqueda de alternativas complementarias, incluyendo el uso de plantas con propiedades bioactivas, las cuales han demostrado capacidad para reducir la carga parasitaria y mejorar la respuesta inmunológica en rumiantes (Hoste et al., 2015; Makkar et al., 2007).

Dentro de estas alternativas, la fitoterapia veterinaria ha cobrado relevancia por el uso de especies vegetales ricas en metabolitos secundarios como los taninos condensados, que pueden ejercer efectos antihelmínticos mediante mecanismos directos e indirectos sobre los parásitos (Hoste et al., 2015; Molan et al., 2000). Entre las especies con mayor potencial destacan *Tithonia diversifolia* y *Canavalia ensiformis*, las cuales presentan perfiles fitoquímicos que podrían contribuir

al control de nematodos gastrointestinales en ovinos bajo condiciones de pastoreo (Arece -García et al., 2018; Alegría-Morán et al., 2017).

No obstante, la eficacia de estas especies depende de múltiples factores, incluyendo la concentración de metabolitos bioactivos, la etapa fenológica de la planta y la interacción con la dieta del animal, por lo que su uso requiere una base técnica sólida que permita su aplicación práctica en sistemas productivos (Parrado et al., 2019; Hoste et al., 2015). En este contexto, el presente trabajo se enfoca en desarrollar y analizar una estrategia fitoterapéutica con *Tithonia diversifolia* y *Canavalia ensiformis* para el control endoparasitario en ovinos de pelo, mediante la revisión crítica de la evidencia científica disponible sobre sus compuestos bioactivos, mecanismos de acción y resultados reportados, con el propósito de establecer criterios técnicos que sustenten su implementación práctica como alternativa complementaria en condiciones de campo.

Metodología

El presente trabajo se desarrolló como una revisión documental de tipo narrativa con enfoque aplicado, orientada al análisis de estrategias fitoterapéuticas para el control endoparasitario en ovinos de pelo. La información se obtuvo a partir de literatura científica especializada en parasitología veterinaria, nutrición de rumiantes y fitoquímica vegetal. La búsqueda se realizó en bases de datos académicas mediante palabras clave relacionadas con parasitismo gastrointestinal, plantas con actividad antihelmíntica y metabolitos secundarios, con énfasis en *Tithonia diversifolia* y *Canavalia ensiformis*. Se seleccionaron fuentes con respaldo científico, relevancia temática y acceso verificable, excluyendo documentos sin consistencia técnica. La información se organizó en ejes temáticos y se sintetizó de manera crítica, con énfasis en su interpretación práctica para condiciones de campo, considerando sistemas de producción extensivos y limitaciones operativas del manejo ovino.

Problemática del parasitismo gastrointestinal en ovinos de pelo

El parasitismo gastrointestinal constituye una de las principales limitantes sanitarias en la producción de ovinos de pelo, particularmente en sistemas de pastoreo extensivo donde las condiciones ambientales favorecen la persistencia de estadios infectivos. Diversos autores han documentado que nematodos como *Haemonchus contortus* generan impactos significativos sobre la salud animal, principalmente por su carácter hematófago, el cual desencadena cuadros de anemia, debilidad y reducción en el desempeño productivo (Kaplan, 2004). En este contexto, la interacción entre clima, manejo y carga parasitaria determina la magnitud del problema en campo, siendo más severo en regiones tropicales (Waller, 2006).

En condiciones productivas reales, la dinámica de infección está estrechamente ligada al comportamiento de pastoreo, donde los ovinos consumen constantemente larvas infectivas presentes en el follaje cercano al suelo. Kaplan y Vidyashankar (2012) señalan que la acumulación de larvas L3 en el pasto se incrementa bajo condiciones de alta humedad, lo que eleva el riesgo de reinfección continua; esto coincide con reportes de Geurden et al. (2014), quienes destacan que los animales jóvenes y en etapas fisiológicas demandantes presentan mayor susceptibilidad debido a una menor capacidad de respuesta inmunológica.



El uso sistemático de antihelmínticos ha sido históricamente la principal herramienta de control; sin embargo, Besier y Love (2003) advierten que la resistencia parasitaria se ha convertido en un problema global que compromete la eficacia de estos tratamientos. Este fenómeno, descrito también por Kaplan (2004), es consecuencia de prácticas como la dosificación inadecuada y la frecuencia excesiva de tratamientos, lo que ha reducido considerablemente las opciones farmacológicas disponibles para el control efectivo en campo.

Más allá de los efectos clínicos evidentes, el parasitismo genera pérdidas subclínicas que afectan de manera silenciosa la productividad del sistema. Waller (2006) describe que la presencia continua de parásitos altera la eficiencia digestiva y la utilización de nutrientes, mientras que Geurden et al. (2014) indican que esto repercute directamente en la ganancia de peso, la conversión alimenticia y el desempeño reproductivo, factores clave en la rentabilidad de la producción ovina.

Ante esta problemática, se reconoce la necesidad de implementar estrategias integradas que reduzcan la dependencia exclusiva de antihelmínticos químicos y permitan un control más sostenible del parasitismo. En este sentido, el uso de plantas con metabolitos secundarios, particularmente aquellas con contenido de taninos condensados, ha sido propuesto como una alternativa viable; de acuerdo con Hoste et al. (2015), estos compuestos pueden contribuir a la reducción de la carga parasitaria cuando se incorporan de manera estratégica en la dieta. Complementariamente, Makkar (2007) señala que su utilización debe considerarse dentro de un esquema de manejo integral que contemple aspectos nutricionales y productivos para maximizar su eficacia en condiciones de campo.

Fitoterapia en el control de parásitos gastrointestinales en ovinos

La fitoterapia aplicada al control de parásitos gastrointestinales en rumiantes ha ganado relevancia como alternativa complementaria frente a la creciente resistencia a los antihelmínticos sintéticos, particularmente en sistemas de producción extensivos donde el uso continuo de fármacos resulta limitado o poco sostenible. Diversas investigaciones han reportado que ciertas plantas contienen metabolitos secundarios con capacidad de afectar el desarrollo, la viabilidad o la reproducción de nematodos gastrointestinales, reduciendo así la presión parasitaria en el hospedador (Athanasiadou et al., 2001; Min & Hart, 2003). Este enfoque no busca reemplazar completamente los tratamientos convencionales, sino integrarse como una herramienta dentro de esquemas de manejo sanitario más diversificados.

Entre los compuestos con mayor interés en este contexto se encuentran los taninos condensados, los cuales han sido ampliamente estudiados por su capacidad de interactuar con estructuras proteicas de los helmintos. Investigaciones experimentales han demostrado que estos compuestos pueden alterar la integridad de la cutícula, afectar la motilidad y reducir la eclosión de huevos y el desarrollo larvario (Paolini et al., 2004; Brunet & Hoste, 2006). Asimismo, se ha documentado que la eficacia de estos metabolitos depende de su concentración, estructura química y biodisponibilidad, lo que implica que no todas las fuentes vegetales generan el mismo efecto antihelmíntico.

Adicionalmente, la acción de la fitoterapia no se limita a efectos directos sobre los parásitos. Algunos estudios han señalado que el consumo de plantas con compuestos bioactivos puede mejorar el



estado nutricional del animal, lo que fortalece la respuesta inmune frente a infecciones parasitarias. En este sentido, se ha observado que la disponibilidad de proteína metabolizable protegida por taninos puede favorecer la resiliencia del hospedador, permitiendo tolerar mejor las cargas parasitarias sin comprometer el desempeño productivo (Niezen et al., 2002; Houdijk & Athanasiadou, 2003).

Desde una perspectiva de aplicación en campo, la incorporación de plantas con actividad antihelmíntica puede realizarse a través de diferentes estrategias, incluyendo el pastoreo directo de especies forrajeras, el suministro de follaje o la inclusión de harinas vegetales en la dieta. De acuerdo con Terrill et al. (2012), el uso de forrajes ricos en taninos en sistemas de pastoreo puede contribuir a reducir el recuento de huevos por gramo de heces, siempre que se manejen niveles adecuados de inclusión. Sin embargo, D'Archivio et al. (2007) advierten que la variabilidad en la concentración de compuestos activos, influenciada por factores como la edad de la planta y las condiciones edafoclimáticas, puede modificar la respuesta observada en campo.

A pesar de su potencial, el uso de fitoterapia requiere un manejo técnico cuidadoso, ya que concentraciones elevadas de ciertos metabolitos pueden afectar la palatabilidad, la digestibilidad e incluso generar efectos antinutricionales si no se controlan adecuadamente. Por ello, su implementación debe basarse en criterios que consideren tanto la eficacia antiparasitaria como el equilibrio nutricional del animal, evitando impactos negativos en la productividad (Min et al., 2015; Patra & Saxena, 2011). Este aspecto resulta clave para su adopción en sistemas reales, donde la prioridad es mantener la eficiencia productiva sin comprometer la salud animal.

Tithonia diversifolia: compuestos bioactivos y potencial antihelmíntico

Tithonia diversifolia, conocida comúnmente como botón de oro, es una especie forrajera ampliamente distribuida en regiones tropicales, cuya relevancia en sistemas pecuarios radica en su elevado valor nutricional y en la presencia de metabolitos secundarios con actividad biológica. Diversos estudios han documentado que esta planta presenta contenidos importantes de proteína cruda, minerales y compuestos fenólicos, lo que la convierte en una alternativa viable como suplemento en rumiantes, especialmente en sistemas extensivos con limitaciones de calidad forrajera (Mahecha & Rosales, 2005; Zapata et al., 2009). Además, su capacidad de adaptación a suelos de baja fertilidad y su rápida tasa de crecimiento facilitan su incorporación en esquemas productivos de bajo costo.

Desde el punto de vista fitoquímico, *T. diversifolia* contiene una diversidad de compuestos bioactivos, entre los que destacan flavonoides, taninos condensados, sesquiterpenos lactónicos y compuestos fenólicos totales, los cuales han sido asociados con múltiples efectos biológicos. Estudios realizados por Pérez et al. (2009) reportan que estos metabolitos presentan actividad antioxidante y antimicrobiana, mientras que investigaciones más recientes han señalado su posible efecto sobre parásitos gastrointestinales al interferir en procesos fisiológicos clave del helminto. En este sentido, la presencia de taninos juega un papel relevante por su capacidad de formar complejos con proteínas estructurales, lo que puede afectar la integridad de los parásitos.

En relación con su potencial antihelmíntico, se ha observado que el consumo de *T. diversifolia* puede contribuir a la reducción de la carga parasitaria en rumiantes, particularmente cuando se integra



como parte de la dieta en sistemas de pastoreo. Arece-García et al. (2018) documentaron que la inclusión de esta especie en la alimentación de bovinos y pequeños rumiantes puede generar efectos positivos sobre parámetros productivos y sanitarios, lo que sugiere un efecto indirecto asociado a la mejora del estado nutricional y la respuesta inmune. De manera complementaria, estudios in vitro han evidenciado que extractos de esta planta pueden inhibir el desarrollo larvario de nematodos, lo que respalda su potencial como herramienta en el control parasitario.

Sin embargo, la eficacia de *T. diversifolia* como agente antihelmíntico no es uniforme y depende de factores como la etapa fenológica, el contenido específico de metabolitos y la forma de administración. Según Medina et al. (2009), la concentración de compuestos fenólicos puede variar significativamente entre hojas jóvenes y maduras, lo que influye directamente en su actividad biológica. Este aspecto es particularmente importante para su aplicación en campo, ya que el momento de corte y suministro puede determinar la efectividad del tratamiento.

Desde una perspectiva práctica, el uso de *T. diversifolia* en sistemas ovinos de pelo puede implementarse mediante el suministro de follaje fresco, ensilado o en forma de harina, dependiendo de las condiciones del sistema productivo. Mahecha y Rosales (2005) destacan que su inclusión como suplemento puede mejorar la ingesta de nutrientes y, al mismo tiempo, aportar compuestos bioactivos que contribuyan al control de parásitos. No obstante, su utilización debe ser estratégica y no excesiva, ya que niveles elevados de ciertos metabolitos pueden afectar la palatabilidad o generar efectos antinutricionales si no se manejan adecuadamente.

Finalmente, es importante resaltar que el uso de *T. diversifolia* como estrategia fitoterapéutica debe considerarse como parte de un enfoque integral de manejo sanitario. La evidencia disponible sugiere que su efecto antihelmíntico es más consistente cuando se combina con prácticas como el manejo del pastoreo y la suplementación nutricional, lo que permite reducir la presión parasitaria sin depender exclusivamente de tratamientos químicos. En este contexto, su valor radica no solo en su efecto directo sobre los parásitos, sino en su contribución al equilibrio productivo del sistema.

Canavalia ensiformis: perfil fitoquímico, efectos biológicos y limitantes en el control parasitario

Canavalia ensiformis, conocida comúnmente como frijol de palo o “jack bean”, es una leguminosa tropical que ha sido utilizada tanto como forraje como abono verde debido a su alta capacidad de fijación de nitrógeno y su adaptación a condiciones edáficas limitantes. Desde el punto de vista nutricional, esta especie presenta un contenido considerable de proteína cruda, lo que la convierte en una opción potencial para complementar dietas en rumiantes; sin embargo, su uso en alimentación animal ha sido moderado debido a la presencia de compuestos antinutricionales que requieren un manejo adecuado para evitar efectos adversos (D’Mello, 2000; Vadivel & Pugalenth, 2008).

En términos fitoquímicos, *C. ensiformis* contiene una variedad de metabolitos secundarios, entre los que destacan alcaloides como la canavanina, además de saponinas, flavonoides y compuestos fenólicos. La canavanina, en particular, es un análogo estructural de la arginina que puede interferir en procesos metabólicos tanto del animal como de organismos parásitos, lo que ha despertado interés en estudios relacionados con actividad biológica y potencial antiparasitario (Rosenthal, 2001; Makkar et al., 2007). Asimismo, las saponinas presentes en esta leguminosa han sido



asociadas con efectos sobre la permeabilidad celular, lo que podría afectar la viabilidad de helmintos en el tracto digestivo.

En relación con su posible efecto antihelmíntico, algunas investigaciones han sugerido que extractos de *C. ensiformis* pueden ejercer acciones inhibitorias sobre el desarrollo larvario de nematodos gastrointestinales, aunque la evidencia es menos consistente en comparación con otras especies ricas en taninos. Estudios preliminares han señalado que la combinación de compuestos fenólicos y saponinas puede generar efectos sinérgicos que afectan la motilidad y la supervivencia de los parásitos, lo que abre una línea de investigación relevante en el contexto de la fitoterapia aplicada (Sánchez-Medina et al., 2015; Ojo et al., 2013).

No obstante, uno de los aspectos más importantes a considerar en el uso de *C. ensiformis* es la presencia de factores antinutricionales, particularmente la canavanina, que puede generar efectos adversos si se consume en altas concentraciones o sin un tratamiento previo. Diversos autores coinciden en que la toxicidad potencial de esta leguminosa limita su uso directo en alimentación animal, por lo que se recomienda aplicar procesos como el secado, tostado o fermentación para reducir la concentración de estos compuestos antes de su inclusión en la dieta (D'Mello, 2000; Vadivel & Janardhanan, 2005).

Desde una perspectiva de aplicación en campo, el uso de *C. ensiformis* como estrategia fitoterapéutica debe abordarse con mayor precaución que en el caso de otras especies como *Tithonia diversifolia*. Su incorporación puede considerarse como complemento en sistemas donde se tenga control sobre el procesamiento del material vegetal y la dosificación, evitando su uso indiscriminado. En este sentido, su potencial no radica únicamente en su posible efecto antihelmíntico directo, sino en su integración dentro de estrategias más amplias que incluyan rotación de forrajes, diversificación de la dieta y reducción de la presión parasitaria (Makkar et al., 2007).

Finalmente, la evidencia disponible sugiere que *C. ensiformis* puede tener un papel complementario en el control del parasitismo gastrointestinal, aunque su utilización requiere mayor respaldo experimental en condiciones de campo. A diferencia de otras especies forrajeras con alto contenido de taninos, su efecto parece depender en mayor medida de la interacción entre sus compuestos bioactivos y el manejo nutricional, por lo que su aplicación debe basarse en criterios técnicos bien definidos que minimicen riesgos y optimicen resultados productivos.

Mecanismos de acción antihelmíntica asociados a metabolitos vegetales

Los metabolitos secundarios presentes en especies como *Tithonia diversifolia* y *Canavalia ensiformis* ejercen su acción antihelmíntica a través de mecanismos directos e indirectos que afectan distintas fases del ciclo biológico de los nematodos gastrointestinales. Entre estos compuestos, los taninos condensados han sido los más estudiados debido a su capacidad para interactuar con proteínas estructurales y enzimas esenciales de los parásitos, generando alteraciones en su integridad fisiológica. Según Brunet y Hoste (2006), estos compuestos pueden interferir en el proceso de exsheathment (desenvainamiento larvario), una etapa crítica para la instalación del parásito en el hospedador, mientras que Athanasiadou et al. (2001) demostraron que también pueden reducir la motilidad y supervivencia de nematodos adultos.



Además de los taninos, otros metabolitos como las saponinas y los alcaloides contribuyen al efecto antihelmíntico mediante mecanismos complementarios. Las saponinas, por su propiedad tensioactiva, pueden alterar la permeabilidad de las membranas celulares de los parásitos, provocando daños estructurales que afectan su viabilidad (Francis et al., 2002). Por su parte, compuestos como la canavanina presente en *Canavalia ensiformis* actúan como análogos de aminoácidos, interfiriendo en la síntesis proteica de los organismos que la incorporan erróneamente, lo que puede comprometer procesos metabólicos esenciales en los helmintos (Rosenthal, 2001).

A nivel del ciclo biológico parasitario, estos metabolitos pueden actuar tanto sobre fases libres como parasitarias. Estudios *in vitro* han evidenciado que ciertos compuestos fenólicos inhiben la eclosión de huevos y el desarrollo larvario, lo cual contribuye a disminuir la contaminación del pastizal y, por ende, la presión de reinfección en los animales (Paolini et al., 2004). Este aspecto es particularmente relevante en sistemas extensivos, donde el control ambiental del parásito es difícil de lograr mediante métodos convencionales.

Por otro lado, los efectos indirectos de estos metabolitos juegan un papel importante en la respuesta del hospedador frente a la infección parasitaria. La interacción de los taninos con proteínas dietéticas puede favorecer el flujo de proteína no degradada al intestino, mejorando la disponibilidad de aminoácidos para el animal y fortaleciendo su capacidad inmunológica. En este sentido, Houdijk et al. (2009) destacan que una mejor nutrición proteica se traduce en mayor resiliencia frente a infecciones parasitarias, mientras que Coop y Kyriazakis (1999) señalan que el estado nutricional del hospedador es un factor determinante en la expresión clínica del parasitismo.

En condiciones de campo, la eficacia de estos mecanismos depende de la concentración y biodisponibilidad de los metabolitos, así como de su interacción con la dieta base del animal. La variabilidad en el contenido de compuestos activos entre especies, e incluso dentro de la misma planta en diferentes etapas de crecimiento, puede influir significativamente en el resultado observado. Asimismo, factores como el consumo voluntario, la palatabilidad y la adaptación del rumen determinan la magnitud del efecto antihelmíntico en sistemas productivos reales (Min et al., 2003; Patra & Saxena, 2011).

En conjunto, los mecanismos de acción de los metabolitos presentes en *Tithonia diversifolia* y *Canavalia ensiformis* sugieren un efecto multifactorial que combina la acción directa sobre los parásitos con mejoras en la respuesta del hospedador. Este enfoque integral respalda su potencial como herramienta dentro de programas de control parasitario, especialmente cuando se integran de manera estratégica con otras prácticas de manejo en sistemas ovinos de pelo.

Aplicación en campo de fitoterapia en ovinos de pelo

La incorporación de especies vegetales con compuestos bioactivos en sistemas de producción ovina representa una estrategia complementaria viable para reducir la presión parasitaria en condiciones de campo. En el caso de *Tithonia diversifolia*, su uso se ha orientado principalmente como suplemento forrajero debido a su buena aceptación por parte de los animales y su valor nutricional. Estudios realizados en sistemas tropicales han señalado que su inclusión en la dieta puede mejorar el aporte de proteína y minerales, lo que contribuye indirectamente a fortalecer la respuesta del hospedador frente a infecciones parasitarias, especialmente en etapas fisiológicas demandantes (Mahecha & Rosales, 2005; Arece-García et al., 2018).



En términos operativos, *T. diversifolia* puede integrarse mediante corte y acarreo, bancos de proteína o en arreglos silvopastoriles, permitiendo su uso estratégico durante periodos críticos de mayor carga parasitaria, como la temporada de lluvias. Este tipo de implementación facilita un suministro controlado y evita el sobreconsumo, lo cual es relevante debido a la variabilidad en la concentración de metabolitos secundarios. De acuerdo con investigaciones sobre forrajes tropicales, la eficiencia de estas estrategias depende en gran medida de la constancia en el suministro y de su integración con prácticas de manejo del pastoreo, como la rotación de potreros (Norton, 1999; Mahecha & Rosales, 2005).

En contraste, el uso de *Canavalia ensiformis* en campo requiere un manejo más cuidadoso debido a la presencia de compuestos antinutricionales, particularmente alcaloides como la canavanina. Aunque esta especie posee potencial como fuente de proteína y compuestos bioactivos, su incorporación directa en la dieta sin tratamiento previo puede afectar el consumo y la salud animal. Por ello, su uso en sistemas ovinos se ha limitado principalmente a formas procesadas, como harinas o materiales previamente tratados mediante secado o tostado, lo cual reduce la concentración de factores tóxicos (D’Mello, 2000; Vadivel & Janardhanan, 2005).

Desde el punto de vista del control parasitario, la aplicación en campo de estas especies no debe considerarse como una herramienta aislada, sino como parte de un enfoque integrado. Terrill et al. (2012) destacan que la combinación de estrategias, incluyendo el manejo del pastoreo, la nutrición adecuada y el uso racional de antihelmínticos, permite una reducción más efectiva de la carga parasitaria en comparación con el uso de una sola intervención. En este sentido, la inclusión de plantas con compuestos bioactivos puede contribuir a disminuir el recuento de huevos por gramo de heces y a reducir la reinfección, especialmente cuando se utiliza en momentos estratégicos del ciclo productivo.

Un aspecto clave para su implementación es la determinación de niveles de inclusión adecuados, ya que tanto la deficiencia como el exceso pueden limitar su efectividad. Investigaciones en nutrición de rumiantes han mostrado que concentraciones moderadas de compuestos secundarios pueden generar efectos positivos sin comprometer la digestibilidad, mientras que niveles elevados pueden afectar la palatabilidad y el consumo voluntario (Min et al., 2015; Patra & Saxena, 2011). Por ello, se recomienda utilizar estas especies como complemento dietético y no como base exclusiva de la alimentación.

Finalmente, la adopción de estas estrategias en sistemas de producción ovina dependerá de factores prácticos como la disponibilidad de las especies vegetales, el conocimiento técnico del productor y las condiciones específicas del sistema productivo. En sistemas tropicales de pequeños productores, donde el acceso a insumos farmacológicos es limitado, el uso de recursos locales como *Tithonia diversifolia* representa una alternativa viable y de bajo costo. Sin embargo, su efectividad dependerá de una correcta planificación y de su integración con otras prácticas de manejo sanitario, evitando sobreestimar su efecto y considerando siempre su papel como herramienta complementaria.



Conclusiones

El uso de *Tithonia diversifolia* y *Canavalia ensiformis* dentro de estrategias fitoterapéuticas representa una alternativa viable y complementaria para el control del parasitismo gastrointestinal en ovinos de pelo, especialmente en sistemas de producción extensivos. La evidencia científica indica que sus metabolitos secundarios pueden ejercer efectos antihelmínticos directos sobre los parásitos, además de contribuir indirectamente a mejorar la respuesta del hospedador mediante el aporte nutricional. Sin embargo, su eficacia en campo depende de factores como la concentración de compuestos bioactivos, la forma de administración y la integración con otras prácticas de manejo sanitario. En este sentido, *Tithonia diversifolia* muestra mayor viabilidad de aplicación por su uso como forraje, mientras que *Canavalia ensiformis* requiere un manejo más controlado debido a sus compuestos antinutricionales. La fitoterapia basada en estas especies no debe considerarse un sustituto de los antihelmínticos convencionales, sino una herramienta estratégica dentro de programas integrados de control parasitario, con potencial para mejorar la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas ovinos en condiciones reales de campo.

Referencias

- Athanasiadou, S., Kyriazakis, I., Jackson, F., & Coop, R. L. (2001). Direct anthelmintic effects of condensed tannins towards gastrointestinal nematodes of sheep. *Veterinary Parasitology*, 99(3), 205–219. [https://doi.org/10.1016/S0304-4017\(01\)00467-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4017(01)00467-8)
- Alegría-Morán, R., et al. (2017). Condensed tannins in tropical forage legumes: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 222, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.10.012>
- Arece-García, J., Ojeda, F., Arzola, C., & Rodríguez, D. (2018). *Tithonia diversifolia*: Forage and nutritional value in ruminant systems. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 52(2), 1–10.
- Besier, R. B., & Love, S. C. J. (2003). Anthelmintic resistance in sheep nematodes. *Australian Veterinary Journal*, 81(4), 220–225. <https://doi.org/10.1111/j.1751-0813.2003.tb11485.x>
- Brunet, S., & Hoste, H. (2006). Monomers of condensed tannins affect the larval exsheathment of parasitic nematodes of ruminants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(20), 7481–7487. <https://doi.org/10.1021/jf061000q>
- Coop, R. L., & Kyriazakis, I. (1999). Nutrition–parasite interaction. *Veterinary Parasitology*, 84(3–4), 187–204. [https://doi.org/10.1016/S0304-4017\(99\)00070-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4017(99)00070-9)
- D'Archivio, M., Filesi, C., Vari, R., Scaccocchio, B., & Masella, R. (2007). Bioavailability of polyphenols: Status and controversies. *International Journal of Molecular Sciences*, 8(2), 132–152. <https://doi.org/10.3390/i8020132>
- D'Mello, J. P. F. (2000). *Anti-nutritional factors and mycotoxins*. CABI Publishing.
- Francis, G., Kerem, Z., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (2002). The biological action of saponins in animal systems. *British Journal of Nutrition*, 88(6), 587–605. <https://doi.org/10.1079/BJN2002725>



- Geurden, T., et al. (2014). Control of gastrointestinal nematodes in ruminants: Current status and future perspectives. *Veterinary Parasitology*, 201(1–2), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.12.001>
- Hoste, H., Torres-Acosta, J. F. J., et al. (2015). Tannin-containing legumes as a model for nutraceuticals against digestive parasites in livestock. *Veterinary Parasitology*, 212(1–2), 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2015.06.026>
- Houdijk, J. G. M., & Athanasiadou, S. (2003). Direct and indirect effects of host nutrition on ruminant gastrointestinal nematodes. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62(2), 351–358. <https://doi.org/10.1079/PNS2003250>
- Houdijk, J. G. M., Kyriazakis, I., Jackson, F., & Huntley, J. F. (2009). Can an increased intake of rumen undegradable protein decrease worm burden? *International Journal for Parasitology*, 39(5), 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2008.10.009>
- Kaplan, R. M. (2004). Drug resistance in nematodes of veterinary importance. *Trends in Parasitology*, 20(10), 477–481. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2004.08.008>
- Kaplan, R. M., & Vidyashankar, A. N. (2012). An inconvenient truth: Global worming and anthelmintic resistance. *Veterinary Parasitology*, 186(1–2), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2011.11.048>
- Mahecha, L., & Rosales, M. (2005). Valor nutricional del botón de oro (*Tithonia diversifolia*). *Livestock Research for Rural Development*, 17(9). <http://www.lrrd.org/lrrd17/9/mahe17095.htm>
- Makkar, H. P. S. (2007). Use of tannin-rich feeds in ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 136(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.11.010>
- Makkar, H. P. S., Siddhuraju, P., & Becker, K. (2007). *Plant secondary metabolites*. Humana Press.
- Medina, M. G., García, D. E., Cova, L. J., & Soca, M. (2009). Chemical composition and secondary metabolites in *Tithonia diversifolia*. *Revista Zootecnia Tropical*, 27(3), 213–220.
- Min, B. R., & Hart, S. P. (2003). Tannins for suppression of internal parasites. *Journal of Animal Science*, 81(Suppl. 2), E102–E109. https://doi.org/10.2527/2003.8113_suppl_2E102x
- Min, B. R., Solaiman, S., Terrill, T., Ramsay, A., Mueller-Harvey, I., & Hart, S. (2015). The role of condensed tannins in the nutrition and health of ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 202, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.01.005>
- Norton, B. W. (1999). *The nutritive value of tree legumes*. FAO Animal Production Paper, 139.
- Ojo, O. A., et al. (2013). Phytochemical properties and biological activity of *Canavalia ensiformis*. *African Journal of Biotechnology*, 12(23), 3660–3665.
- Paolini, V., Frayssines, A., De La Farge, F., Dorchies, P., & Hoste, H. (2004). Effects of condensed tannins on established populations of gastrointestinal nematodes in goats and sheep. *Veterinary Parasitology*, 120(4), 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2004.01.016>



- Parrado, J., et al. (2019). Bioactive compounds in tropical forage species. *Journal of Agricultural Science*, 11(4), 45–56. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n4p45>
- Patra, A. K., & Saxena, J. (2011). Exploitation of dietary tannins to improve rumen metabolism and ruminant nutrition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(1), 24–37. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4152>
- Pérez, A., Montejo, I., Iglesias, J. M., & Mendoza, H. (2009). Evaluación fitoquímica de *Tithonia diversifolia*. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 43(1), 45–50.
- Rosenthal, G. A. (2001). L-Canavanine: A higher plant defense compound. *Amino Acids*, 21(3), 319–330. <https://doi.org/10.1007/s007260170026>
- Sánchez-Medina, A., et al. (2015). Biological activity of leguminous plants with antiparasitic potential. *Revista de Fitoterapia*, 15(2), 95–104.
- Terrill, T. H., et al. (2012). Grazing systems and parasite control in small ruminants. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 28(3), 421–432. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2012.07.004>
- Vadivel, V., & Janardhanan, K. (2005). Nutritional and antinutritional properties of *Canavalia ensiformis*. *Food Chemistry*, 92(3), 447–453. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.002>
- Vadivel, V., & Pugalenti, M. (2008). Nutritional evaluation of *Canavalia ensiformis* seeds. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 8(3), 249–256.
- Waller, P. J. (2006). Sustainable nematode parasite control strategies for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 126(3–4), 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.08.007>
- Zapata, A., Vargas, J., & Ríos, C. (2009). Evaluación nutricional de *Tithonia diversifolia* en sistemas ganaderos tropicales. *Revista MVZ Córdoba*, 14(3), 1882–1889.



Canales prácticos para la ganadería integral: biodiversidad funcional e integración de sistemas multiestratos.

L. M. Morales-Crispín¹, D. A. Lara Rodríguez^{2*}, D. Vázquez Luna², F. Rosales Martínez³, S. Martínez Gómez¹, P. D. Gallegos Sánchez¹.

¹Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria, Universidad Veracruzana; Carretera Costera del Golfo km 220, Col. Agrícola Michapan, Acayucan, Veracruz, México, C.P. 96100.

² Centro de Estudios Interdisciplinarios en Agrobiodiversidad, Universidad Veracruzana; Carretera Costera del Golfo km 220, Col. Agrícola Michapan, Acayucan, Veracruz, México, C.P. 96100.

³Facultad Maya de Estudios Agropecuarios. Universidad Autónoma de Chiapas. Carretera Catazajá – Palenque, km 4. Catazajá, Chiapas, México, C.P. 29980.

**dlara@uv.mx autor corresponsal*

Resumen— La ganadería bovina tropical enfrenta limitaciones productivas y ambientales derivadas del uso de pasturas en monocultivo, lo que ha impulsado la búsqueda de sistemas más eficientes y sostenibles. En este contexto, los sistemas silvopastoriles multiestrato han emergido como una alternativa basada en la integración de árboles, arbusto y pasturas, favoreciendo la biodiversidad funcional y la optimización de recursos. El presente trabajo tuvo como objetivo analizar y sistematizar los canales prácticos para la implementación de la ganadería integral bajo este enfoque. Mediante una revisión integradora, se identificaron estrategias relacionadas con el diseño, establecimiento y manejo del sistema. Los resultados indican mejoras en la producción de biomasa, el rendimiento animal y los servicios ecosistémicos, como la fertilidad del suelo y el secuestro de carbono. Se concluye que estos sistemas representan una opción viable para incrementar la eficiencia productiva y la sostenibilidad en la ganadería bovina.

Introducción

La ganadería bovina en regiones tropicales se ha desarrollado predominantemente bajo sistemas extensivos basados en pasturas en monocultivos, los cuales si bien han permitido sostener la producción pecuaria, presentan limitaciones significativas en términos de eficiencia productiva y sostenibilidad ambiental. Diversos trabajos han documentado que estos sistemas se asocian con procesos de degradación del suelo, pérdida de biodiversidad y bajos niveles de producción de carne y leche por unidad de superficie, lo que compromete la viabilidad del sistema en el mediano y largo plazo (Saucedo-Uriarte et al., 2023).

En respuesta a estas limitaciones, los sistemas silvopastoriles han sido propuestos como una alternativa de intensificación sostenible, en la cual la integración de árboles, arbustos y pasturas permite mejorar las condiciones productivas y ambientales del sistema. En este tipo de arreglos, la incorporación de especies leñosas favorece el reciclaje de nutrientes, la fijación biológica de nitrógeno y la mejora en las condiciones microclimáticas, lo que repercute tanto en la productividad del forraje como en el bienestar animal (Murgueitio et al., s.f.; CARvalho et al., 2024). Asimismo, se ha demostrado que estos sistemas pueden generar mayores niveles de producción de biomasa y mejorar el desempeño productivo del ganado en comparación con sistemas convencionales (López-Vigoa et al., 2017).

Un elemento central en la comprensión de estos sistemas es el concepto de biodiversidad funcional, el cual hace referencia al conjunto de especies que desempeñan funciones específicas dentro del ecosistema, y que contribuyen al mantenimiento del procesos ecológicos esenciales. En este sentido, la integración de distintos estratos vegetales permite maximizar el aprovechamiento de recursos como la luz, el agua y los nutrientes, además de aumentar la resiliencia del sistema frente

a condiciones adversas (Carvalho et al., 2024; Manono & Mwami, 2026). Esta organización multiestrato no solo incrementa la complejidad estructural del sistema, sino que también favorece la provisión de servicios ecosistémicos clave como la conservación del suelo, la regulación del microclima y el secuestro de carbono (Torres et al., 2022).

A pesar de la evidencia científica que respalda los beneficios de estos sistemas, su adopción a nivel de campo continúa siendo limitada, en gran medida debido a la falta de estrategias claras que orienten su implementación. La transición desde sistemas convencionales hacia esquemas integrados requiere no solo conocimiento técnico, sino también una estructuración lógica de los procesos que permita a los productores incorporar de manera gradual y efectiva los distintos componentes del sistema (Chará et al., 2019; FAO, 2022).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar y sistematizar los canales prácticos para la implementación de la ganadería integral bajo un enfoque de biodiversidad funcional e integración de sistemas multiestrato, con la finalidad de contribuir al desarrollo de sistemas productivos más eficientes, resilientes y sostenibles en la ganadería bovina.

Metodología

El presente trabajo se desarrolló bajo un enfoque de revisión integradora con orientación aplicada, cuyo objetivo fue analizar, sintetizar y organizar evidencia científica relevante sobre la implementación práctica de sistemas silvopastoriles y multiestrato en ganadería bovina, con énfasis en su impacto productivo ambiental. Este tipo de revisión permite integrar resultados provenientes de estudios experimentales, revisiones sistemáticas, informes técnicos y documentos institucionales, con la finalidad de construir un marco conceptual y operativo que facilite su aplicación en campo.

Resultados y discusión

Biodiversidad funcional en la ganadería

La biodiversidad funcional en los sistemas ganaderos constituye un pilar para la sostenibilidad productiva, al integrar organismos que desempeñan funciones ecológicas clave del agroecosistema. En sistemas basados en monocultivos forrajeros, la reducción de la diversidad biológica se ha asociado con degradación del suelo, menor eficiencia productiva y pérdida de resiliencia, evidenciando la necesidad de incorporar enfoques que reconozcan el papel activo de la biodiversidad en el funcionamiento del sistema (Saucedo-Urriarte et al., 2023).

En este contexto, los sistemas silvopastoriles incrementan la diversidad estructural mediante la integración de árboles, arbustos y pastos, lo que fortalece procesos ecológicos como el ciclo de nutrientes y la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Trejo-Arista et al., 2023). Además, las especies leñosas contribuyen a aumentar la disponibilidad de biomasa y la calidad nutricional del forraje, al aportar proteína y mejorar la digestibilidad (López-Vigoa et al., 2017).

Desde un enfoque funcional, esta diversificación también favorece la regulación biológica del sistema. La mayor heterogeneidad del hábitat promueve comunidades de invertebrados más diversas, lo que contribuye al control natural de plagas y a la estabilidad del agroecosistema (Kinneen et al., 2023). Paralelamente, la presencia de árboles genera microclimas que reducen el

estrés térmico, mejorando el consumo de alimento, la eficiencia de conversión y la producción (Cisneros-Saguilán et al., 2024), además de favorecer la conservación de la biodiversidad a escala de paisaje (De la Peña-Domene et al., s.f.).

A nivel global, los sistemas silvopastoriles presentan mayor riqueza biológica y estabilidad ecológica que los sistemas convencionales, promoviendo procesos esenciales como la fijación de nitrógeno, el secuestro de carbono y el ciclado de nutrientes (Pérez-Alvarez et al., 2023; Murgueitio et al., s.f.). En conjunto, la biodiversidad funcional debe entenderse como un proceso de rediseño ecológico que integra suelo, plantas y animales, transformando la ganadería en un sistema más eficiente, resiliente y ambientalmente sostenible (Saucedo-Urriarte et al., 2023; Trejo-Arista et al., 2023).

Sistemas multiestrato como base ecológica de la ganadería integral

Los sistemas multiestrato constituyen un enfoque estructural dentro de la agroforestería que organiza la biodiversidad funcional en distintos niveles verticales, integrando árboles, arbustos, pastos y animales en una unidad productiva bajo un diseño intencional orientado a maximizar la complementariedad ecológica y la eficiencia productiva (Carvalho et al., 2024). Este arreglo no solo incrementa la complejidad del sistema, sino que optimiza el uso de recursos mediante la diferenciación en la captura de luz, agua y nutrientes, reduciendo la competencia y favoreciendo interacciones facilitadoras entre especies (Keerthika et al., 2024).

En términos operativos, la estructura multiestrato se organiza en tres niveles principales: un estrato herbáceo que provee la base energética, un estrato arbustivo que incrementa la disponibilidad de proteína y un estrato arbóreo que regula el microclima y contribuye al reciclaje de nutrientes (Agrosavia, s.f.). La interacción entre estos componentes constituye al núcleo funcional del sistema, donde los árboles mejoran la fertilidad del suelo mediante hojarasca, fijación biológica de nitrógeno y exploración de nutrientes profundos, mientras que el ganado participa en el reciclaje de materia orgánica (Pandey, 2026).

No obstante, estas interacciones pueden implicar tanto sinergias como procesos de competencia, por lo que la eficiencia depende del diseño espacial, la selección de especies y el manejo integral del sistema (Keerthika et al., 2024; Mackay-Smith et al., 2025). En conjunto, la evidencia indica que los sistemas multiestrato incrementan la multifuncionalidad ecológica, mejorando el ciclado de nutrientes, la captura de carbono y la estabilidad del sistema sin comprometer la producción (Mathieu et al., 2025).

En regiones tropicales, esta estructura permite un uso más eficiente del espacio productivo, incrementando la biomasa y fortaleciendo la sostenibilidad ganadera (Agrosavia, s.f.). Así, los sistemas multiestrato incrementan la multifuncionalidad ecológica, mejorando el ciclado de nutrientes, la captura de carbono y la estabilidad del sistema sin comprometer la producción (Carvalho et al., 2024; Mathieu., 2025).



Canales prácticos para la implementación

La implementación de sistemas silvopastoriles y multiestrato debe entenderse como un proceso planificado que integra diagnóstico, diseño, establecimiento, manejo y evaluación continua, más que como la simple incorporación de árboles en el potrero. La literatura coincide en que estos sistemas alcanzan mayor eficiencia cuando se estructuran mediante fases operativas que inician con el análisis del sitio y concluyen con la evaluación del desempeño productivo y ecológico, evitando enfoques improvisados o de ensayo y error (Velarde Guillén et al., 2025; Fike et al., 2023). En este sentido, los canales prácticos representan una secuencia ordenada de decisiones técnicas orientadas a transformar sistemas convencionales en unidades productivas con mayor funcionalidad ecológica y eficiencia en el uso de recursos (Zapata Cadavid & Silva Tapasco, 2020; Center for Agroforestry, 2024).

El primer canal corresponde al diagnóstico predial, etapa en la cual se determinan las condiciones biofísicas y operativas que condicionan la viabilidad del sistema. Se recomienda evaluar variables como relieve, pendiente, características del suelo, drenaje, disponibilidad de la gua, accesibilidad y distribución de potreros, así como identificar áreas potenciales para arborización o establecimiento de bancos forrajeros (Velarde Guillén et al., 2025; Fike et al., 2023). Esta fase también incluye la definición de objetivos productivos, ya que el diseño del sistema varía en función de si prioriza confort animal, producción forestal, recuperación de suelos o diversificación del ingreso (Mayerfeld, 2025; Fike et al., 2017). En terrenos con pendiente, la planificación debe incorporar prácticas de manejo de escorrentía, como curvas a nivel o bordos, lo cual ha demostrado mejorar la supervivencia del componente arbóreo en condiciones reales de producción (Quinto et al., 2009; Velarde Guillén et al., 2025).

El segundo canal es el diseño del sistema, que incluye el arreglo espacial y la selección de especies. Este componente es determinante, ya que influye en la interacción entre estratos, la disponibilidad de luz y la competencia por recursos. Los sistemas pueden establecerse mediante árboles dispersos, cercas vivas, callejones, bancos forrajeros o configuraciones intensivas con arbustos, dependiendo de los objetivos y condiciones del sistema (Center for Agroforestry, 2024; Zapata Cadavid & Silva Tapasco, 2020). La evidencia indica que el arreglo espacial impacta directamente la productividad, por lo que la distancia entre hileras y el diseño de callejones deben ajustarse al tipo de maquinaria, tolerancia al sombreado y función del componente arbóreo (Fike et al., 2017; Mayerfeld, 2025). De hecho, se ha demostrado que ciertos arreglos pueden incrementar significativamente biomasa y la producción de proteína en comparación con sistemas convencionales, lo que resalta la importancia del diseño como criterio técnico central (Saucedo-Uriarte et al., 2022; Center for Agroforestry, 2024).

El tercer canal corresponde al establecimiento del sistema, fase crítica debido a la alta vulnerabilidad del componente arbóreo en etapas iniciales. La competencia con gramíneas, el pisoteo y el ramoneo pueden comprometer la supervivencia de las plántulas, por lo que se recomienda preparar adecuadamente la línea de plantación, reducir la competencia y proteger los árboles mediante cercas, protectores individuales o exclusión temporal del pastoreo (Center for Agroforestry, 2024; Fike et al., 2023). La literatura enfatiza que el éxito del establecimiento depende de considerar estas prácticas como componentes esenciales del sistema, y no como medidas accesorias (Mayerfeld, 2025; Fike et al., 2017). Asimismo, el establecimiento implica manejo temprano, incluyendo control de malezas, fertilización, poda, raleo y manejo sanitario, lo que refuerza la idea de que implementar

no es solo sembrar, sino sostener el proceso hasta lograr estabilidad productiva (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022; Zapata Cadavid & Silva Tapasco, 2020).

El cuarto canal se relaciona con el manejo del sistema, particularmente del pastoreo, la infraestructura y la distribución del agua. El pastoreo rotacional se ha identificado como un elemento clave, ya que permite la recuperación del forraje, reduce la compactación del suelo, protege los árboles jóvenes y mejora la distribución de nutrientes a través del estiercol (Center for Agroforestry, 2024; Zapata Cadavid & Silva Tapsco, 2020). Además, la adecuada disposición de cercas, subdivisiones, áreas de descanso y bebederos influye directamente en el comportamiento animal, afectando el tiempo de pastoreo y la presión sobre distintas áreas del potrero (Center for Agroforestry, 2024; Fike et al., 2023). En este contexto, el diseño del sistema debe integrar desde el inicio la logística interna del predio, considerando acceso a maquinaria, rotación intensiva y protección del arbolado (Fike et al., 2017; Meyerfeld, 2025).

Un quinto canal corresponde a los factores sociales e institucionales que condicionan la adopción del sistema. Aunque los beneficios de los sistemas silvopastoriles están ampliamente documentados, su implementación depende de la disponibilidad de asistencia técnica, incentivos económicos, capacitación y condiciones territoriales favorables (Chamorro-Vargas. Et al., 2025; Alvarado Sandino et al., 2023). Elementos como pagos por servicios ecosistémicos, existencia de fincas demostrativas y acompañamiento técnico han demostrado facilitar la adopción, mientras que limitaciones económicas, climáticas o de mercado pueden restringirla (Chamorro-Vargas et al., 2025; Alvarado Sandino et al., 2023). Esto evidencia que la implementación efectiva requiere integrar componentes sociales y estrategias de Naturales, 2022; Trejo-Arista et al., 2023).

Finalmente, la implementación se consolida mediante un proceso de evaluación y ajuste continuo, considerando que los sistemas silvopastoriles son dinámicos y cambian con el crecimiento del componente arbóreo y las condiciones del entorno, con el fin de sustentar decisiones sobre manejo, carga animal, poda o rediseño del sistema (Velarde Guillén et al., 2025; Fike et al., 2023). Este enfoque adaptativo es consistente con la evidencia que indica que los sistemas diversificados incrementan la multifuncionalidad ecológica cuando se gestionan de manera integral (Wang et al., 2019; Trejo-Arista et al., 2023).

En conjunto, los canales prácticos no deben entenderse como etapas aisladas, sino como un proceso integrado de transición productiva, donde cada decisión, desde el diagnóstico hasta la evaluación, define la capacidad del sistema para operar con mayor resiliencia, eficiencia y sostenibilidad (Center for Agroforestry, 2024; Chamorro-Vargas et al., 2025).

Impacto productivo y ambiental

La transición de sistemas ganaderos convencionales hacia esquemas silvopastoriles responde a la necesidad de superar limitaciones estructurales asociadas con baja eficiencia productiva y deterioro ambiental. En sistemas tropicales tradicionales, se ha documentado menor producción de carne y leche, junto con la degradación del suelo y pérdida de biodiversidad, lo que compromete la sostenibilidad en el mediano y largo plazo (Saucedo Uriarte et al., 2023).

Desde el punto de vista productivo, la incorporación de árboles y arbustos forrajeros incrementa significativamente la disponibilidad de biomasa y el desempeño animal. Se han reportado

producciones superiores a 30 toneladas de materia seca por hectárea al año, con rendimientos de leche de 10 a 12 kg por vaca al día y ganancias de peso entre 0.42 y 1.10kg por animal, evidenciando una mejora en la eficiencia biológica del sistema (López Vigoa et al., 2017). Sin embargo, estos resultados no se explican únicamente por la cantidad de forraje, sino por mejoras en la calidad nutricional, ya que la inclusión de especies arbóreas, particularmente leguminosas, incrementa la proteína cruda y la digestibilidad, lo que favorece el consumo y la conversión alimenticia, con aumentos en la producción de leche de hasta 30% respecto a sistemas convencionales (Aguilar Pérez et al., s.f.).

A nivel ecofisiológico, la interacción entre los componentes arbóreo, herbáceo y animal constituye el núcleo funcional del sistema. La cobertura arbórea modifica el microclima, reduce el estrés térmico y regula la radiación incidente, favoreciendo el crecimiento del estrato forrajero. A su vez, se desarrollan las dinámicas de competencia y complementariedad por recursos que, bajo un manejo adecuado, optimizan su uso (Fernández Mayer, 2017).

En el ámbito ambiental, los sistemas silvopastoriles generan múltiples servicios ecosistémicos. Se ha demostrado que mejoran la fertilidad del suelo, el ciclado de nutrientes, la biodiversidad y la regulación microclimática, además de reducir procesos erosivos y mejorar la calidad del agua (Carvalho et al, 2024). Estos efectos se asocian con la mayor complejidad estructural del sistema, que favorece la estabilidad ecológica.

La mejora del suelo constituye un componente central, ya que la incorporación de árboles incrementan la materia orgánica, la actividad microbiana y la retención de humedad, lo que contribuye a estabilizar la producción y reducir la dependencia de insumos externos (Manono & Mwami, 2026). Asimismo, estos sistemas presentan una mayor capacidad de secuestro de carbono biomasa y suelo, contribuyendo a la mitigación del cambio climático (Torres et al., 2022), mientras que la fijación biológica de nitrógeno mejora el reciclaje de nutrientes (Murgueitio., s.f.).

En conjunto, los sistemas silvopastoriles integran productividad y sostenibilidad en un mismo marco funcional. Diversos estudios han demostrado que incrementan la eficiencia del uso del suelo, la rentabilidad y el aporte al desarrollo rural sin comprometer los recursos naturales, posicionándose como una estrategia clave para la ganadería del futuro (Chará et al., 2019; FAO, 2022).

Conclusión

Los sistemas silvopastoriles multiestrato representan una alternativa sólida frente a las limitaciones productivas y ambientales de la ganadería convencional. Su implementación permite incrementar simultáneamente la producción de biomasa, la eficiencia y la estabilidad del sistema, mientras fortalece procesos ecológicos clave como fertilidad del suelo, el ciclado de nutrientes y el secuestro de carbono. A diferencia de los sistemas basados en monocultivos, estos esquemas integran de manera funcional los componentes arbóreo, herbáceo y animal, generando sinergias que optimizan el uso de recursos y reducen la dependencia de insumos externos. En este sentido, el impacto de los sistemas silvopastoriles no debe entenderse como la suma de beneficios aislados, sino como un cambio estructural en la lógica de producción ganadera. Por tanto, su adopción constituye una estrategia viable y necesaria para avanzar hacia sistemas productivos más resilientes, eficientes y ambientalmente sostenibles, particularmente en regiones tropicales donde las condiciones climáticas y edáficas exigen modelos de manejo más integrados.



Referencias bibliográficas

- Aguilar Pérez, C., Solorio Sánchez, F., Ku Vera, J., Magaña Monforte, J., & Santos Flores, J. (s. f.). Producción de leche y carne en sistemas silvopastoriles. *Bioagrocencias*. <https://www.revista.cba.uady.mx/ojs/index.php/BAC/article/viewFile/2911/1299>
- Alvarado Sandino, C. O., Barnes, A. P., Sepúlveda, I., Garratt, M. P. D., Thompson, J., & Escobar-Tello, M. P. (2023). Examining factors for the adoption of silvopastoral agroforestry in the Colombian Amazon. *Scientific Reports*, 13, 12252. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39038-0>
- Carvalho, C. B. M., Mello, A. C. L., Cunha, M. V., Apolinário, V. X. O., Dubeux Júnior, J. C. B., Silva, V. J., Medeiros, A. S., Izidro, J. L. P. S., & Bretas, I. L. (2024). Ecosystem services provided by silvopastoral systems: A review. *The Journal of Agricultural Science*. <https://doi.org/10.1017/S0021859624000000>
- Center for Agroforestry. (2024). Chapter 4: Silvopasture. En *Training manual for applied agroforestry practices* (2024 ed.). University of Missouri Center for Agroforestry.
- Chamorro-Vargas, C. T., Morgan, S., Pantevéz, H., Gomez, M., Kennedy, C. M., & Kremen, C. (2025). Enablers and barriers to adoption of sustainable silvopastoral practices for livestock production in Colombia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1600091. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1600091>
- Chará, J., Reyes, E., Peri, P., Otte, J., Arce, E., & Schneider, F. (2019). Silvopastoral systems and their contribution to improved resource use and sustainable development goals (SDG): Evidence from Latin America. *FAO, CIPAV & Agri Benchmark*. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca2792en>
- Cisneros-Saguilán, P., Hernández-Salinas, G., & Hernández, M. (2024). Sistemas silvopastoriles, una alternativa para atenuar el impacto del cambio climático en la ganadería. *Idesia*, 42(2). <https://doi.org/10.4067/S0718-34292024000200051>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). (s.f.). *Establecimiento y manejo de un sistema silvopastoril multiestrato en el valle cálido del Alto Magdalena*.
- De la Peña-Domene, M., et al. (s.f.). Sistemas silvopastoriles enriquecidos: una propuesta para integrar la conservación en la producción ganadera. *Acta Botánica Mexicana*.
- Fernández Mayer, A. (2017). Producción de carne y leche bovina en sistemas silvopastoriles. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). <https://sociedadesostenible.co/wp-content/uploads/2024/07/Produccion-de-leche-y-carne-bovina-en-sistemas-silvopastoriles-Anibal-Fernandez-Mayer.pdf>
- Fike, J., Castillo, M., Naumann, H., Philipp, D., & Severino da Silva, L. (2023). Climate smart practices – Silvopasture practice introduction and implementation guide sheet (Report No. 2023-5). Grasslands Partnership.



- Fike, J., Downing, A., Munsell, J., Frey, G. E., Mercier, K., Pent, G., Teutsch, C., Daniel, J. B., Fisher, J., Adams, M., & Groh, T. (2017). Creating silvopastures: Some considerations when planting trees in pastures (CSES-185P). Virginia Cooperative Extension.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2022). Grazing with trees: A silvopastoral approach to managing and restoring drylands (FAO Forestry Paper No. 187). FAO. <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/f1e21d8c-1f35-4c6e-ab7e-51ee842384d1/download>
- Keerthika, A., Lakshmi, P., Chavan, S. B., Subbu Lakshmi, V., Choudhary, K. K., Noor Mohamed, M. B., Chichaghare, A. R., Verma, A., & Gupta, D. K. (2024). *Multistrata agroforestry systems: Spatial and temporal utilization of resources for higher production and better income*. Springer.
- Kinneen, L., et al. (2023). Silvopastoral systems benefit invertebrate biodiversity on tropical livestock farms in Caquetá, Colombia. *Agricultural and Forest Entomology*, 26(1), 126–134. <https://doi.org/10.1111/afe.12594>
- López-Vigoa, O., Sánchez-Santana, T., Iglesias-Gómez, J. M., Lamela-López, L., Soca-Pérez, M., Arece-García, J., & Milera-Rodríguez, M. (2017). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y Forrajes*, 40(2), 83–95. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942017000200001
- Mackay-Smith, T. H., Spiekermann, R. I., Richards, D. R., Harcourt, N., & Burkitt, L. L. (2025). *An integrative approach to silvopastoral system design: Perspectives, potentials and principles*. New Zealand Journal of Agricultural Research.
- Maneschy, R. Q., Santana, A. C. de, Bastos da Veiga, J., & Carvalho Figueiras, G. (2008). Análisis económico de sistema silvopastoriles con paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber) en el nordeste de Pará, Brasil. *Zootecnia Tropical*, 26(3), 403–405.
- Manono, B. O., & Mwami, B. (2026). Agroforestry and soil health: A review of impacts and potential for sustainable agriculture. *Earth*, 7(1), 31. <https://doi.org/10.3390/earth7010031>
- Mathieu, A., Martin-Guay, M. O., & Rivest, D. (2025). *Enhancement of agroecosystem multifunctionality by agroforestry: A global quantitative summary*. *Global Change Biology*.
- Mayerfeld, D. (2025). Establishing silvopasture by planting trees. University of Wisconsin–Madison Extension.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). Guía técnica de buenas prácticas ambientales y sociales de sistemas silvopastoriles: Arborización en fincas ganaderas en el marco de REDD+ en República Dominicana. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Murgueitio, E., Barahona, R., Martins, R., Flores, M. X., Chará, J., & Solorio, F. J. (s. f.). Intensive silvopastoral systems: Improving sustainability and efficiency in cattle ranching landscapes. FAO/CIPAV.



https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/nr/sustainability_pathways/docs/Columbia_Murgueitio_Mixed_Species_Silvopastoral_systems.pdf

- Pandey, A. (2026). *Tree–crop–livestock interactions in agroforestry systems*. Orbit Ink Publication.
- Pérez-Álvarez, R., et al. (2023). Global meta-analysis reveals overall benefits of silvopastoral systems for biodiversity. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2023.07.30.551160>
- Quinto, L., Martínez-Hernández, P. A., Pimentel-Bribiesca, L., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2009). Planeación de un sistema silvopastoril en ladera en Huatusco, Veracruz aplicando el método Nezahualcóyotl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(2).
- Saucedo-Uriarte, J. A., Díaz-Quevedo, C., Milla Pino, M. E., Durand Chávez, L. M., Linares Rivera, J. L., Vásquez Pérez, H. V., & Quispe-Ccasa, H. A. (2023). Sustentabilidad productiva de la instalación de sistemas silvopastoriles: Una revisión sistemática basada en la realidad de Perú y Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(2). https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:3048
- Saucedo-Uriarte, J. A., Oliva-Cruz, S. M., Maicelo-Quintana, J. L., Meléndez-Mori, J. B., & Collazos-Silva, R. (2022). Arreglos silvopastoriles con *Alnus acuminata* y su efecto sobre parámetros productivos y nutricionales del componente forrajero. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(2), 573–583. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5007>
- Torres, B., Bravo, C., Torres, A., Tipán-Torres, C., Vargas, J. C., Herrera-Feijoo, R. J., Heredia, M., Barba, C., & García, A. (2022). Carbon stock assessment in silvopastoral systems along an elevational gradient in the Ecuadorian Amazon. *Sustainability*, 15(1), 449. <https://doi.org/10.3390/su15010449>
- Trejo-Arista, L. K., Cortés-Díaz, E., Martínez-Hernández, P. A., & Huerta-Bravo, M. (2023). Sistemas silvopastoriles: Una estrategia para la resiliencia ambiental en empresas ganaderas. *Pastos y Forrajes*, 46, e19.
- Velarde Guillén, J., Romero Delgado, G., Durand Chávez, L. M., Zárate Díaz, R., Alegre Orihuela, J., & Gómez Bravo, C. (2025). Manual técnico: Establecimiento y manejo de sistemas silvopastoriles en el trópico peruano. Proyecto Sistemas Silvopastoriles Multipropósito y Ganadería Familiar en Perú y Colombia.
- Wang, L., Delgado-Baquerizo, M., Wang, D., Isbell, F., Liu, J., Feng, C., Liu, J., Zhong, Z., Zhu, H., Yuan, X., Chang, Q., & Liu, C. (2019). Diversifying livestock promotes multidiversity and multifunctionality in managed grasslands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(13), 6187–6192. <https://doi.org/10.1073/pnas.1807354116>
- Weigelt, A., et al. (s.f.). Ecosystem services and functions of biodiversity in grasslands.
- Zapata Cadavid, Á., & Silva Tapasco, B. E. (2020). *Sistemas silvopastoriles: Aspectos teóricos y prácticos* (2.ª ed.). CARDER/CIPAV.



Sistemas forrajeros mixtos para la producción ovina tropical: impacto productivo y sostenibilidad agroecológica

L. M. Morales-Crispín^{1*}, F. Ledezma Cruz¹, C. Aguilar García¹, G. Cebrero González¹, L. A. Becerra Lomas¹.

¹Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria, Universidad Veracruzana; Carretera Costera del Golfo km 220, Col. Agrícola Michapan, Acayucan, Veracruz, México, C.P. 96100.

[*luismorales03@uv.mx](mailto:luismorales03@uv.mx) autor corresponsal

Resumen— Los sistemas forrajeros mixtos constituyen una alternativa viable para mejorar la eficiencia productiva y la sostenibilidad de la ovinocultura tropical, al integrar gramíneas, arbóreas y fuentes energéticas en la dieta. En el presente trabajo se describe un sistema implementado en el módulo ovino de la Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria, basado en pastoreo (6–8h/día) complementado con bancos de proteína mediante corte y acarreo. La inclusión de especies como *Morus alba*, *Leucaena leucocephala*, *Guazuma ulmifolia* y *Manihot esculenta* permite mejorar la calidad nutricional de la dieta, optimizando la relación proteína-energía y la eficiencia alimenticia (Knowles et al., 2012; Aguilar Gutiérrez, 2022). Además de sus beneficios productivos y agroecológicos, este sistema favorece la formación práctica de estudiantes, al integrar conocimientos teóricos con toma de decisiones en campo (Castillo Linares et al., 2021). En conjunto, representa una estrategia funcional para la producción ovina sostenible.

Introducción

La producción ovina en regiones tropicales se caracteriza por enfrentar limitaciones relacionadas con la variabilidad en la disponibilidad y calidad de los recursos forrajeros, particularmente en sistemas basados en monocultivos de gramíneas. Estas condiciones reducen el contenido de proteína y la digestibilidad de la dieta, lo que impacta negativamente el desempeño productivo de los animales y limita la eficiencia del sistema (Aguilar Gutiérrez, 2022). En este contexto, la dependencia exclusiva del pastoreo dificulta la estabilización de la producción, especialmente durante periodos de estacionalidad climática.

Ante esta problemática, los sistemas forrajeros mixtos han surgido como una estrategia para mejorar la calidad de la alimentación mediante la integración de especies con diferentes características nutricionales. La incorporación de arbóreas y arbustivas en sistemas de producción ovina permite aumentar la disponibilidad de proteína y minerales, además de mejorar la estabilidad del suministro de forraje a lo largo del año (Casanova-Lugo et al., 2014). Asimismo, la combinación de fuentes energéticas no convencionales, como la yuca (*Manihot esculenta*), contribuye a optimizar la relación proteína-energía en la dieta, favoreciendo la eficiencia de utilización de los nutrientes y el desempeño productivo (Knowles et al., 2012; Jiwuba & Jiwuba, 2020).

Por otro lado, los sistemas silvopastoriles basados en estrategias de corte y acarreo han demostrado ser una alternativa viable para la producción ovina sostenible, al permitir integrar el aprovechamiento de recursos locales con la reducción del uso de insumos externos (Castillo Linares et al., 2021). Este enfoque no solo mejora la eficiencia productiva, sino que también fortalece la resiliencia del sistema al diversificar las fuentes de alimento y promover procesos ecológicos que favorecen la disponibilidad y calidad del forraje.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo describir e interpretar el funcionamiento de un sistema forrajero mixto implementado en el módulo de ovinos de la Facultad de Ingeniería en



Sistemas de Producción Agropecuaria, destacando su impacto en la producción, su contribución a la sostenibilidad agroecológica y su valor como herramienta formativa para estudiantes en proceso de formación profesional.

Metodología

El presente trabajo se desarrolló mediante un enfoque de síntesis técnico-aplicada, que integra información científica con la experiencia práctica generada en el módulo de producción ovina de la Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria. Se realizó una revisión dirigida de literatura especializada sobre nutrición ovina tropical, sistemas forrajeros mixtos y uso de especies arbóreas y energéticas en alimentación de rumiantes, seleccionando fuentes relevantes y verificables.

De manera complementaria, se incorporó la descripción del sistema forrajero implementado en el módulo, el cual se basa en un esquema de pastoreo controlado (6–8 horas diarias) complementado con banco de proteína mediante corte y acarreo, utilizando especies como *Morus alba*, *Leucaena leucocephala*, *Guazuma ulmifolia*, *Gmelina arborea* y *Manihot esculenta*. La integración de la información se realizó bajo un enfoque sistémico, analizando la interacción entre los componentes nutricionales, productivos y formativos del sistema, con el objetivo de generar una interpretación aplicada y contextualizada para la producción ovina tropical.

Resultados y discusión

Fundamento ecológico y nutricional de los sistemas forrajeros mixtos en ovinos tropicales

Los sistemas forrajeros mixtos representan una estrategia de intensificación sostenible en la producción ovina tropical, al integrar especies con diferentes características estructurales y valores nutritivos que permiten optimizar la utilización de los recursos disponibles. En contraste con sistemas basados en monocultivos forrajeros, donde la dieta depende principalmente de gramíneas de calidad variable, la incorporación de arbóreas, arbustivas y especies energéticas permite construir dietas más equilibradas y funcionales desde el punto de vista nutricional y ecológico. Desde una perspectiva nutricional, la complementariedad entre especies constituye el eje central de estos sistemas. Forrajes arbóreos como la morera (*Morus alba*) destacan por su alto contenido de proteína cruda, superior al 15% de la materia seca, y su elevada digestibilidad, que puede alcanzar valores entre 70 y 90%, lo que los convierte en una fuente eficiente de nutrientes para rumiantes en condiciones tropicales (García et al., 2006). Estas características contrastan con las gramíneas tropicales, cuya calidad suele disminuir en épocas críticas, particularmente durante la estación seca, generando deficiencias nutricionales que limitan el desempeño productivo.

Además del aporte proteico, otras especies como *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* han demostrado capacidad para complementar dietas deficientes, aportando no solo proteína, sino también minerales y compuestos bioactivos que pueden influir en la salud y eficiencia digestiva de los animales. La inclusión de estas especies en la dieta ovina ha mostrado efectos positivos en la ganancia de peso y en la eficiencia productiva, particularmente cuando se integran como suplemento a forrajes de menor calidad (Medina y Sánchez, 2006; Le Bodo et al., 2020). Este efecto se explica por la mejora en el balance nutricional de la dieta y por la disponibilidad de nutrientes de mayor calidad respecto a los sistemas convencionales.



Desde un enfoque ecológico, los sistemas forrajeros mixtos no solo incrementan la diversidad de la dieta, sino que también favorecen interacciones funcionales entre los componentes vegetales. Estudios sobre mezclas forrajeras en sistemas silvopastoriles han demostrado que la combinación de especies genera efectos asociativos que modifican positivamente la fermentación ruminal, incrementando la degradabilidad y la eficiencia de utilización de la materia orgánica (Cuartas et al., 2015). Este fenómeno indica que la inclusión de múltiples especies no solo tiene un efecto aditivo, sino sinérgico, donde la interacción entre componentes mejora el aprovechamiento global de los nutrientes.

Asimismo, la integración de especies leñosas en sistemas de producción ovina permite estabilizar la disponibilidad de forraje a lo largo del año, reduciendo la variabilidad asociada a la estacionalidad característica de los sistemas tropicales. En particular, especies como *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* mantienen niveles de calidad superiores durante periodos de escasez, lo que contribuye a sostener la productividad del sistema bajo condiciones adversas (Casanova-Lugo et al., 2014). Esta capacidad de amortiguar fluctuaciones en la oferta forrajera representa un componente clave de la resiliencia del sistema.

En conjunto, los sistemas forrajeros mixtos deben entenderse como una estrategia integral que articula principios nutricionales y ecológicos, donde la diversidad de especies no solo incrementa la calidad de la dieta, sino que mejora la eficiencia del sistema productivo a través de interacciones biológicas complejas. Bajo este enfoque, la alimentación ovina deja de depender de una sola fuente forrajera y se transforma en un sistema dinámico, capaz de adaptarse a condiciones variables y de sostener la producción en el trópico.

Sistema forrajero del módulo ovino: integración funcional con enfoque formativo

El sistema forrajero implementado en el módulo ovino se basa en la integración de pastoreo controlado con suplementación mediante banco de proteína, configurando un modelo mixto adaptado a condiciones tropicales. Este tipo de sistemas ha sido descrito como una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad de la producción ovina, particularmente en unidades donde la calidad del forraje basal es variable y depende de factores climáticos (Castillo Linares et al., 2021; Bernal Moncada et al., 2015). En este sentido, la incorporación de follaje arbóreo mediante corte y acarreo permite complementar la dieta y reducir la dependencia de insumos externos, fortaleciendo la estabilidad productiva del sistema.

El componente basal está constituido por el pastoreo diario, el cual aporta principalmente energía a partir de gramíneas tropicales; sin embargo, su calidad disminuye conforme avanza la madurez del forraje o en condiciones de sequía, afectando el contenido de proteína y la digestibilidad. La importancia del nivel proteico en ovinos tropicales es ampliamente reconocida, ya que incrementos en la concentración de proteína cruda en la dieta se asocian con mejoras en la ganancia de peso y la eficiencia de conversión alimenticia (Aguilar Gutiérrez, 2022). Por ello, la suplementación estratégica mediante bancos de proteína resulta fundamental para mantener el equilibrio nutricional del sistema.

El banco forrajero del módulo integra especies con funciones nutricionales diferenciadas. La incorporación de *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* permite aportar proteína de alta



calidad y nutrientes esenciales que superan el valor nutritivo de muchas gramíneas tropicales, especialmente en condiciones de estacionalidad (Casanova-Lugo et al., 2014). Además, el uso de follaje arbóreo en la alimentación de ovinos ha demostrado mejorar el desempeño productivo y la eficiencia digestiva cuando se utiliza como suplemento estratégico del pastoreo (Castillo Linares et al., 2021). De esta manera, el banco de proteína no solo incrementa la disponibilidad de nutrientes, sino que estabiliza la dieta a lo largo del año.

La incorporación de yuca (*Manihot esculenta*) en el sistema responde a la necesidad de equilibrar la relación proteína-energía, elemento clave en la nutrición de rumiantes. La yuca ha sido documentada como una fuente rica en almidones altamente degradables en el rumen, lo que permite mejorar el aprovechamiento de la proteína dietaria y mantener el rendimiento productivo (Knowles et al., 2012; Jiwuba & Jiwuba, 2020). Asimismo, su uso en combinación con espedes proteicas como *Leucaena leucocephala* no afecta negativamente el consumo ni los parámetros ruminales, lo que respalda su inclusión en dietas mixtas (Díaz-Echeverría et al., 2017). Este balance entre energía y proteína es esencial para lograr eficiencia en sistemas de alimentación basados en recursos locales.

El manejo del banco de proteína se realiza en función de la dinámica de rebrote de las especies, ajustando el momento de corte para ofrecer forraje en estados fenológicos óptimos. Se ha demostrado que la calidad nutricional del follaje depende directamente de la edad de la planta, ya que etapas tempranas presentan mayor contenido de proteína y menor lignificación, lo que se traduce en mayor digestibilidad (Hue, 2012). Este criterio permite optimizar el valor nutritivo del suplemento ofrecido y mejorar su aprovechamiento por parte de los ovinos.

Desde un enfoque integral, el sistema forrajero del módulo responde a principios de diversificación funcional, donde la combinación de especies permite mejorar la resiliencia frente a la variabilidad ambiental y optimizar el uso de los recursos. La integración de fuentes proteicas, energéticas y estructurales no solo incrementa la disponibilidad de nutrientes, sino que favorece la eficiencia global del sistema productivo (Castillo Linares et al., 2021). Bajo esta lógica, el sistema no depende de un solo recurso, sino de la interacción entre sus componentes.

Finalmente, el sistema adquiere un valor adicional como herramienta formativa, ya que permite a los estudiantes participar en la toma de decisiones relacionadas con la alimentación animal, el manejo del banco de proteína y la evaluación productiva. Este tipo de aprendizaje aplicado facilita la integración de conocimientos teóricos con su implementación en condiciones reales, fortaleciendo competencias en nutrición, manejo de recursos y enfoque agroecológico (Cuartas et al., 2015; Castillo Linares et al., 2021). Así, el sistema no solo mejora la producción ovina, sino que también contribuye a la formación de profesionales con una visión integral de la ganadería sostenible.

Manejo alimenticio y toma de decisiones en sistemas forrajeros mixtos

El manejo alimenticio en sistemas forrajeros mixtos para ovinos tropicales se caracteriza por ser un proceso dinámico que integra la disponibilidad de recursos, su valor nutritivo y la respuesta animal. A diferencia de sistemas convencionales basados en dietas estáticas, los esquemas que combinan pastoreo con suplementación mediante banco de proteína requieren ajustes continuos para

garantizar un adecuado balance nutricional, particularmente bajo condiciones de variabilidad climática (Castillo Linares et al., 2021; Aguilar Gutiérrez, 2022). En este sentido, la toma de decisiones se fundamenta en la interacción entre oferta forrajera y requerimientos del animal, lo que permite mantener la eficiencia productiva del sistema.

El pastoreo constituye la base energética del sistema, aportando fibra y nutrientes a partir de gramíneas tropicales; sin embargo, su calidad puede disminuir significativamente en función del estado de madurez y de la estacionalidad. La reducción en contenido de proteína y digestibilidad del forraje base afecta directamente el consumo voluntario y la eficiencia de conversión, situación ampliamente documentada en la producción ovina tropical (Aguilar Gutiérrez, 2022). Bajo estas condiciones, la suplementación estratégica mediante bancos de proteína se convierte en una decisión técnica clave para mantener el desempeño productivo, al corregir deficiencias nutricionales y mejorar el ambiente ruminal.

El uso de bancos de proteína en sistemas ovinos ha demostrado ser una alternativa eficiente para complementar dietas basadas en pastoreo, permitiendo integrar especies con mayor valor nutricional dentro de la alimentación diaria. Estos sistemas, que combinan corte y acarreo con pastoreo, favorecen una mayor estabilidad en la calidad de la dieta y reducen la dependencia de insumos externos (Bernal Moncada et al., 2015; Castillo Linares et al., 2021). En este contexto, la inclusión de follaje arbóreo en proporciones controladas permite aportar proteína y minerales sin sustituir la base fibrosa del sistema, manteniendo un adecuado equilibrio ruminal.

Uno de los criterios fundamentales en la toma de decisiones es la sincronización entre proteína y energía en la dieta. En sistemas donde predominan gramíneas con bajo contenido proteico, la incorporación de especies arbóreas ricas en proteína mejora la utilización de los carbohidratos estructurales, favoreciendo la fermentación ruminal y la producción animal (Aguilar Gutiérrez, 2022; Díez-Echeverría et al., 2017). De manera complementaria, la inclusión de fuentes energéticas como la yuca (*Manihot esculenta*) contribuye a mejorar la eficiencia de uso de la proteína, al proporcionar almidones altamente degradables que favorecen la síntesis microbiana y el aprovechamiento de los nutrientes (Knowles et al., 2012; Jiwuba & Jiwuba, 2020).

Otro elemento clave en el manejo del sistema es la definición del momento óptimo de corte del banco de proteína. La calidad nutritiva del follaje depende directamente del estado fisiológico de la planta, ya que el contenido de proteína tiende a disminuir y la fibra estructural a aumentar conforme avanza la madurez. En este sentido, el corte en etapas tempranas de rebrote permite ofrecer forrajes con mayor digestibilidad y valor nutritivo, mientras que cortes tardíos reducen la eficiencia de aprovechamiento por parte de los ovinos (Hue, 2012). Este criterio técnico es fundamental para maximizar la calidad del suplemento y garantizar su impacto en la dieta.

La diversificación de especies dentro del sistema también constituye un elemento estratégico en la toma de decisiones, ya que permite distribuir la producción de biomasa a lo largo del año y reducir la dependencia de una sola fuente forrajera. La integración de especies con diferentes velocidades de crecimiento y adaptaciones ambientales favorece la estabilidad del sistema frente a condiciones climáticas adversas, lo que contribuye a mejorar su resiliencia productiva (Casanova-Lugo et al., 2014; Castillo Linares et al., 2021). Este enfoque reduce los riesgos asociados a la estacionalidad y asegura una oferta más constante de alimento de calidad.

Asimismo, el manejo alimenticio implica considerar el comportamiento ingestivo de los animales y la forma en que acceden al suplemento. La distribución adecuada del follaje, el control de la carga animal y la organización del tiempo de pastoreo influyen directamente en el consumo y en la eficiencia del sistema. En sistemas silvopastoriles, se ha señalado que la correcta integración entre manejo del pastoreo y suministro de suplemento es determinante para evitar desperdicios y asegurar un consumo homogéneo (Castillo Linares et al., 2021).

Desde el punto de vista formativo, el manejo alimenticio representa un espacio clave para el aprendizaje aplicado, ya que los estudiantes participan en la evaluación del rebrote, la calidad del forraje y la respuesta animal, integrando conocimientos teóricos con su aplicación práctica. Este tipo de experiencias favorece el desarrollo de habilidades en toma de decisiones, manejo de recursos y comprensión de sistemas agroecológicos complejos, donde la producción depende de múltiples factores interrelacionados (Cuartas Cardona et al., 2015; Castillo Linares et al., 2021). De esta forma, el sistema no solo optimiza la alimentación ovina, sino que también fortalece la formación integral de los futuros profesionales.

En conjunto, el manejo alimenticio en sistemas forrajeros mixtos debe entenderse como un proceso adaptativo, en el cual la eficiencia no depende de la disponibilidad de un solo recurso, sino de la capacidad de integrar múltiples componentes de manera estratégica. Este enfoque permite mejorar la productividad, reducir costos y fortalecer la sostenibilidad del sistema, al mismo tiempo que promueve una visión integral de la producción ovina tropical.

Impacto productivo, agroecológico y formativo

La implementación de sistemas forrajeros mixtos en la producción ovina tropical genera impactos significativos tanto en el desempeño productivo como en la sostenibilidad del sistema, al integrar recursos alimenticios con diferente valor nutricional y comportamiento ecológico. En condiciones tropicales, donde la variabilidad en la calidad del forraje limita la productividad, la inclusión de especies arbóreas y fuentes energéticas permite incrementar la eficiencia biológica del sistema, favoreciendo la ganancia de peso, la conversión alimenticia y la estabilidad productiva (Aguilar Gutiérrez, 2022; Castillo Linares et al., 2021). Este efecto se asocia con la mejora en la calidad de la dieta y con una mayor disponibilidad de nutrientes en comparación con sistemas basados exclusivamente en gramíneas.

Desde el punto de vista productivo, la suplementación estratégica mediante bancos de proteína contribuye a optimizar el ambiente ruminal, favoreciendo la digestibilidad de la dieta y el aprovechamiento de los nutrientes. Se ha documentado que el incremento en el contenido de proteína de la dieta mejora la eficiencia de conversión y la ganancia de peso en ovinos de pelo, especialmente cuando se corrigen deficiencias propias de sistemas tropicales (Aguilar Gutiérrez, 2022). De manera complementaria, la inclusión de especies arbóreas como *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* permite mantener una dieta de mayor calidad durante periodos de escasez, lo que contribuye a estabilizar la producción a lo largo del año (Casanova-Lugo et al., 2014).

El uso de fuentes energéticas como la yuca (*Manihot esculenta*) refuerza este efecto al mejorar la relación proteína-energía de la dieta, lo que favorece la síntesis de proteína microbiana en el rumen y optimiza la utilización de los nutrientes disponibles (Knowles et al., 2012; Jiwuba & Jiwuba, 2020). Además, su inclusión en dietas mixtas no afecta negativamente el consumo ni las condiciones



ruminales, lo que la convierte en un recurso viable para complementar sistemas basados en forrajes arbóreos (Díaz-Echeverría et al., 2017). En conjunto, estas interacciones permiten mejorar la eficiencia global del sistema productivo, reduciendo la dependencia de concentrados comerciales y optimizando el uso de recursos locales.

En el ámbito agroecológico, los sistemas forrajeros mixtos promueven la diversificación funcional del agroecosistema, lo que se traduce en beneficios como mayor estabilidad del sistema, mejor uso del suelo y reducción de riesgos asociados a la estacionalidad. La integración de especies con diferentes características fisiológicas permite distribuir la producción de biomasa a lo largo del año, amortiguando las fluctuaciones en la disponibilidad de alimento (Casanova-Lugo et al., 2014; Castillo Linares et al., 2021). Asimismo, la incorporación de componentes arbóreos favorece procesos como el reciclaje de nutrientes, la mejora de la fertilidad del suelo y la regulación del microclima, lo que incrementa la resiliencia del sistema productivo.

Adicionalmente, estos sistemas contribuyen a la reducción de la presión sobre los recursos naturales al disminuir la dependencia de insumos externos y fomentar el uso de recursos locales. La producción de biomasa dentro del mismo sistema productivo permite cerrar ciclos de nutrientes y reducir costos de alimentación, lo que incrementa la viabilidad económica de las unidades de producción ovina (Bernal Moncada et al., 2015; Castillo Linares et al., 2021). Este enfoque es consistente con principios de sostenibilidad, donde la eficiencia no solo se mide en términos productivos, sino también en la capacidad de mantener el sistema en el tiempo con menor impacto ambiental.

Desde la perspectiva formativa, el impacto de estos sistemas trasciende la producción animal, ya que constituyen un entorno de aprendizaje práctico donde los estudiantes pueden aplicar conocimientos teóricos en condiciones reales. La participación activa en el manejo del sistema, la evaluación de la calidad de los forrajes y la toma de decisiones alimenticias permite desarrollar competencias clave en nutrición animal, manejo de sistemas productivos y enfoque agroecológico (Cuartas Cardona et al., 2015; Castillo Linares et al., 2021). Este tipo de aprendizaje fortalece la capacidad de análisis de los estudiantes, facilitando la comprensión de la complejidad de los sistemas ganaderos.

Asimismo, el enfoque integrador de estos sistemas fomenta una visión sistémica de la producción pecuaria, donde los aspectos productivos, ambientales y sociales se articulan en un mismo modelo. La experiencia del módulo ovino permite que los estudiantes comprendan que la eficiencia productiva no depende únicamente del incremento de insumos, sino de la adecuada gestión de los recursos disponibles y de la interacción entre los componentes del sistema (Cuartas Cardona et al., 2015). Este proceso de formación contribuye al desarrollo de profesionales capaces de diseñar e implementar sistemas más sostenibles.

En conjunto, los sistemas forrajeros mixtos en la producción ovina tropical representan una alternativa que integra productividad, sostenibilidad y formación académica. Su impacto se refleja en la mejora del desempeño animal, la optimización del uso de recursos y la generación de conocimiento aplicado, posicionándose como una estrategia clave para la transición hacia modelos de producción más resilientes y eficientes.



Conclusiones

El sistema forrajero mixto analizado demuestra que la integración estratégica de pastoreo con banco de proteína permite mejorar la calidad de la dieta y estabilizar la producción ovina en condiciones tropicales. Más que un incremento de insumos, el resultado depende del manejo dinámico de los recursos disponibles y de la complementariedad entre especies.

Este enfoque reduce la dependencia externa, incrementa la resiliencia del sistema y transforma la alimentación en un proceso de toma de decisiones continuo. Además, su implementación en el módulo ovino evidencia que estos sistemas no solo mejoran la eficiencia productiva, sino que constituyen una herramienta efectiva para la formación práctica de estudiantes con enfoque agroecológico.

Referencias

- Aguilar Gutiérrez, G. (2022). *Efecto de los niveles de proteína sobre el comportamiento metabólico y productivo de ovinos de pelo en condiciones tropicales*. Tecnológico Nacional de México.
- Bernal Moncada, C. M., Jaramillo, D. A., & Hernández, J. P. (2015). Establecimiento de un banco de proteína, pasto de corte y lombricultivo en un sistema familiar de producción ovina.
- Casanova Lugo, F., Solorio Sánchez, F. J., Ramírez Avilés, L., Caamal Maldonado, J. A., & Ku Vera, J. C. (2014). Forage yield and quality of *Leucaena leucocephala* and *Guazuma ulmifolia* in tropical silvopastoral systems. *Tropical Grasslands—Forrajes Tropicales*, 2, 24–26.
- Castillo Linares, E. B., López Herrera, M. A., Vélez Izquierdo, A., & Oliva Hernández, J. (2021). Sistema silvopastoril de cosecha y acarreo como alternativa para la producción ovina sostenible en el trópico húmedo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66).
- Cuartas Cardona, C. A., Naranjo Ramírez, J. F., Tarazona Morales, A. M., Barahona Rosales, R., Rivera Herrera, J. E., Arenas Sánchez, F. A., & Correa Londoño, G. A. (2015). Valor nutritivo y cinética de fermentación in vitro de mezclas forrajeras utilizadas en sistemas silvopastoriles intensivos. *Zootecnia Tropical*, 33(4), 295–306.
- Díaz Echeverría, V., Casanova Lugo, F., Piñeiro Vázquez, A., et al. (2017). Voluntary intake and ruminal protozoa population in sheep fed *Leucaena leucocephala* and *Manihot esculenta*.
- García, D., Noda, Y., Medina, M., Martín, G., & Soca, M. (2006). La morera: una alternativa viable para la alimentación animal en el trópico. *Revista de la Asociación Interamericana de Agronomía*.
- Hue, K. T. (2012). *Feeding cassava foliage to sheep: Nutrient properties and hydrogen cyanide toxicity*. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae.
- Jiwuba, P. C., & Jiwuba, L. C. (2020). Productive and physiological response of small ruminants fed cassava (*Manihot esculenta*). *Zhivotnovadni Nauki*, 57(2), 17–31.
- Knowles, M. M., Pabón, M. L., & Carulla, J. E. (2012). Uso de la yuca (*Manihot esculenta*) en la alimentación de rumiantes. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 25(3).
- Le Bodo, E., Hornick, J. L., Moula, N., Zúñiga Serrano, A., & Martínez Alfaro, J. C. (2020). Assessment of gastrointestinal parasites and productive parameters on sheep fed on a ration supplemented with *Guazuma ulmifolia*. *Animals*, 10(9), 1617. <https://doi.org/10.3390/ani10091617>
- Medina, R., & Sánchez, A. (2006). Efecto de la suplementación con follaje de *Leucaena leucocephala* sobre la ganancia de peso en ovinos. *Zootecnia Tropical*, 24(1), 55–68.



Suplemento fermentado aeróbico en bovinos doble propósito: desempeño productivo en Veracruz

E. Lara Hernández¹, N. B. Acar Martínez^{1*}, D. A. Lara Rodríguez², D. Vázquez Luna²

¹Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria, Universidad Veracruzana, campus Acayucan. Carretera Costera del Golfo km 220, Col. Agrícola Michapan, C.P. 96100, Veracruz, México.

²Centro de Estudios Interdisciplinarios en Agrobiodiversidad (CEIAbio), Universidad Veracruzana, campus Acayucan, Veracruz, México.

*nacar@uv.mx (Autor de correspondencia)

Artículo: científico

Resumen---Se valoró el impacto de la suplementación con fermentado aeróbico en indicadores productivos de bovinos de doble propósito bajo condiciones de pastoreo tropical en el sur de Veracruz, México. El diseño experimental fue completamente al azar con tres tratamientos: pastoreo con fermentado aeróbico (T1), pastoreo con alimento comercial (T2) y pastoreo convencional sin suplemento (T3). Durante 120 días se cuantificaron la producción diaria de leche y la ganancia de peso corporal en 90 animales. Los resultados evidenciaron que T1 generó los mejores indicadores productivos con diferencias estadísticamente significativas a partir del día 30 ($p < 0.001$). El fermentado aeróbico, elaborado a partir de forrajes locales, melaza y levadura *Saccharomyces cerevisiae*, se perfila como una opción viable, accesible y sostenible para optimizar la productividad en sistemas ganaderos tropicales de pequeña escala.

Palabras clave: Bovinos doble propósito, fermentado aeróbico, ganancia de peso, producción de leche, suplementación tropical.

Introducción

La ganadería bovina de doble propósito en las regiones tropicales de México constituye un pilar fundamental tanto para la economía rural como para la seguridad alimentaria de las comunidades locales. En Veracruz, uno de los estados con mayor inventario ganadero nacional, esta actividad se desarrolla predominantemente bajo sistemas de pastoreo extensivo o silvopastoril, donde la disponibilidad y calidad del forraje fluctúa considerablemente a lo largo del año. Factores como las sequías estacionales, la baja fertilidad de suelos y las limitaciones de acceso a insumos tecnológicos condicionan la eficiencia productiva y comprometen la rentabilidad de los productores [1].

Los sistemas de doble propósito representan aproximadamente el 40% de la producción cárnica bovina y el 30% de la producción láctea del país, con una presencia especialmente significativa en el sur-sureste, donde Veracruz y Chiapas concentran los mayores volúmenes de producción [2]. Sin embargo, la productividad de estos sistemas continúa rezagada respecto a su potencial biológico, en gran medida por las deficiencias nutricionales que padecen los animales durante la época seca, cuando la calidad de los pastos decrece notablemente en contenido de proteína cruda y digestibilidad. Esta brecha nutricional se traduce en menores ganancias de peso en los becerros y caída en la producción láctea de las vacas [3].

En el contexto internacional, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura ha reconocido que los sistemas de doble propósito en América Latina y el Caribe representan la principal fuente de proteína animal para millones de familias rurales y que su modernización tecnológica debe sustentarse en estrategias de bajo costo, adaptadas a las condiciones locales y con mínimo impacto ambiental [7]. En México, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática reportó en la Encuesta Nacional Agropecuaria 2022 que



Veracruz alberga el mayor inventario bovino a nivel nacional, con más de 4.5 millones de cabezas, de las cuales aproximadamente el 65% se mantienen bajo sistemas de producción extensivos o silvopastoriles de doble propósito, subrayando la relevancia de identificar estrategias nutricionales que eleven la competitividad de este sector [8].

Frente a este panorama, la suplementación estratégica ha emergido como una de las alternativas con mayor potencial para cerrar la brecha entre la producción real y la potencial. Entre los suplementos de origen biotecnológico, los fermentados aeróbicos elaborados a base de insumos locales —como el pasto de corte (*Pennisetum purpureum*), melaza, urea y levadura viva— han captado la atención de investigadores y técnicos por su bajo costo de producción, relativa sencillez de elaboración y potencial para modular positivamente la microbiota ruminal. La levadura *Saccharomyces cerevisiae* actúa como un microorganismo benéfico que estabiliza el pH ruminal, favorece el crecimiento de bacterias celulolíticas y mejora la eficiencia de fermentación [4, 5].

La suplementación con *Saccharomyces cerevisiae* ha mostrado resultados prometedores en condiciones de estrés calórico, circunstancias análogas a las prevalentes en el trópico veracruzano durante los meses de mayor temperatura. Investigaciones en sistemas tropicales de Asia y América Latina documentan que la incorporación de este microorganismo en la dieta favorece el incremento en la proporción de bacterias fibrolíticas del género *Ruminococcus* y *Fibrobacter succinogenes*, acelera la degradación de la fibra vegetal y amplía la disponibilidad de ácidos grasos volátiles como principal fuente energética, lo que repercute favorablemente en el desempeño productivo de los animales [4, 5]. La versatilidad de este microorganismo para sobrevivir en condiciones aeróbicas y adaptarse a una amplia gama de sustratos permite elaborar suplementos con subproductos agrícolas locales, reduciendo costos y favoreciendo la independencia tecnológica de los productores.

Investigaciones recientes desarrolladas en regiones tropicales del sureste asiático han demostrado que la suplementación con líquidos fermentados de origen microbiano puede incrementar la producción de leche, la digestibilidad de nutrientes y la ingesta de materia seca en vacas lactantes [6]. Sin embargo, la aplicación de esta tecnología en condiciones específicas del trópico húmedo mexicano, particularmente en sistemas bovinos de pequeña escala con razas de doble propósito, carece aún de suficiente respaldo experimental local. Por consiguiente, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta productiva de vacas en lactación y becerros en crecimiento ante la suplementación con fermentado aeróbico, en comparación con un alimento comercial y un grupo testigo sin suplemento, bajo condiciones de pastoreo silvopastoril en el municipio de Cosoleacaque, Veracruz.

Metodología

Área de estudio y características climáticas

El experimento se realizó en una Unidad de Producción Pecuaria (UPP) de régimen silvopastoril ubicada en el municipio de Cosoleacaque, Veracruz (18.010580° N; -94.607312° O). La zona presenta un clima cálido húmedo con temperatura media anual de 27 °C y precipitación que oscila entre 1 900 y 2 600 mm anuales; los meses de febrero a abril corresponden al periodo de mayor déficit hídrico y mayo al mes más caluroso [9]. Estas condiciones representan fielmente el trópico húmedo donde las variaciones estacionales de forraje constituyen el principal limitante productivo.

Animales y grupos experimentales



Se trabajó con 90 bovinos repartidos equitativamente en dos categorías productivas. El primer grupo incluyó 45 vacas en producción láctea con peso vivo promedio de 480 a 500 kg; la leche producida se registró semanalmente mediante una báscula digital marca Rhino (250 kg de capacidad). El segundo grupo comprendió 45 becerros y becerras de aproximadamente siete meses de edad, cuya ganancia de peso corporal se cuantificó mediante pesajes mensuales con una báscula mecánica marca Revuelta (capacidad de una tonelada). Ambos grupos fueron distribuidos en tres tratamientos conforme a un diseño completamente al azar (DCA): T1 = pastoreo + fermentado aeróbico; T2 = pastoreo + alimento comercial; T3 = pastoreo convencional sin suplemento (testigo).

Elaboración del suplemento fermentado aeróbico

La preparación del fermentado comprendió dos etapas secuenciales. En la primera se activó la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) diluyendo el inóculo en agua tibia con melaza durante 30 min. En la segunda se formuló la mezcla base con pasto de corte picado, melaza, urea, sulfato de amonio y la suspensión de levadura activada. La fermentación aeróbica se llevó a cabo a temperatura ambiente (27–32 °C) durante 72 h, transcurridas las cuales el producto se suministró fresco a los animales del tratamiento T1 en una dosis complementaria al pastoreo diario.

Análisis bromatológico del fermentado

Previo al inicio del experimento se realizó un análisis bromatológico del fermentado aeróbico para caracterizar su valor nutritivo. Las muestras del producto se recolectaron al finalizar el periodo de fermentación de 72 h y se analizaron en el laboratorio de nutrición animal de la Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria de la Universidad Veracruzana. Los parámetros evaluados fueron: materia seca (MS), proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), extracto etéreo (EE), cenizas y energía metabolizable (EM), siguiendo los métodos estándar de la Association of Official Analytical Chemists [10]. La energía metabolizable se estimó a partir de la digestibilidad in vitro de la materia seca mediante la ecuación propuesta por el Agricultural Research Council, en tanto que el pasto de corte *Pennisetum purpureum* sin fermentar se analizó con la misma metodología para disponer de un valor de referencia comparativo.

Variables evaluadas y análisis estadístico

Las variables productivas analizadas fueron: (1) producción de leche en litros por vaca por día y por periodo; y (2) ganancia diaria de peso (GDP), calculada como la diferencia entre el peso final y el peso inicial dividida entre el número de días del periodo. Para el análisis económico se estimaron costos fijos (infraestructura y equipo), costos variables (insumos alimenticios), costo total (CT = costo fijo + costo variable) y rentabilidad (ganancia/inversión). Los datos se procesaron con el software JASP (v. 0.18.1) mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía bajo el modelo $Y_{ij} = \mu + t_i + \epsilon_{ij}$, donde Y_{ij} es la observación del tratamiento i para la unidad j , μ la media general, t_i el efecto del tratamiento y ϵ_{ij} el error experimental. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Resultados y discusión

Composición bromatológica del fermentado aeróbico

El análisis bromatológico del fermentado aeróbico (Tabla 1) reveló un perfil nutritivo favorable para su uso como suplemento en bovinos de doble propósito. La proteína cruda alcanzó un valor de $16.8 \pm 0.4\%$ en base seca, superior al umbral mínimo de 12% considerado necesario para una fermentación ruminal óptima y para satisfacer los requerimientos de mantenimiento en bovinos

bajo pastoreo tropical [4]. Este incremento proteico respecto a la materia prima original (*Pennisetum purpureum* sin fermentar: 9.1% PC) se atribuye a la actividad metabólica de la levadura, que sintetiza proteína microbiana a partir del nitrógeno no proteico aportado por la urea durante la fermentación aeróbica.

La fibra detergente neutro (FDN) registró un valor de $48.3 \pm 1.2\%$, sustancialmente inferior al del pasto de corte sin fermentar ($63.5 \pm 1.8\%$), lo que refleja la degradación parcial de la pared celular vegetal inducida por la actividad enzimática microbiana. La fibra detergente ácido (FDA) fue de $29.7 \pm 0.8\%$, con una digestibilidad potencial de la materia seca estimada en 62–65%. La energía metabolizable de 2.54 ± 0.07 Mcal/kg MS es comparable a la de alimentos comerciales de mantenimiento, lo que refuerza la pertinencia del fermentado aeróbico como sustituto parcial de éstos en sistemas de producción de bajos insumos. Resultados similares han sido documentados por Sholikhah et al. [12] y por Ciriaco et al. [11], quienes reportaron incrementos en la digestibilidad de la materia seca de entre 7 y 12% al utilizar productos de fermentación de *S. cerevisiae*, atribuibles a la mejora en la degradación de la pared celular vegetal.

Tabla 1. Composición bromatológica del fermentado aeróbico y del pasto de corte sin fermentar (% en base seca, n = 3).

Parámetro	Fermentado aeróbico	Pasto de corte (ref.)
Materia seca (%)	22.4 ± 0.6	18.3 ± 0.9
Proteína cruda (%)	16.8 ± 0.4	9.1 ± 0.7
FDN (%)	48.3 ± 1.2	63.5 ± 1.8
FDA (%)	29.7 ± 0.8	39.2 ± 1.1
Extracto etéreo (%)	2.1 ± 0.1	1.8 ± 0.2
Cenizas (%)	8.4 ± 0.3	7.6 ± 0.4
EM (Mcal/kg MS)	2.54 ± 0.07	2.09 ± 0.11

Ganancia de peso en becerros

Al inicio del experimento no se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos en el peso corporal de los becerros ($p = 0.968$), lo que confirmó la homogeneidad de los grupos experimentales. A partir de los 30 días de suplementación se observaron diferencias altamente significativas ($p < 0.001$) que se mantuvieron constantes hasta el final del periodo de 120 días (Figura 1). T1 destacó consistentemente como el tratamiento de mayor desempeño, seguido de T2, mientras que T3 registró los pesos más bajos durante todo el experimento.

La GDP promedio en T1 fue de 0.800 kg/día, resultado consistente con los rangos reportados en estudios internacionales recientes que documentan incrementos de entre 0.78 y 0.85 kg/día en bovinos suplementados con preparados fermentados que incluyen *S. cerevisiae* como componente activo. Xue et al. [5], trabajando con rumiantes en condiciones de estrés calórico —circunstancias

análogas a las del trópico veracruzano—, reportaron que dosis bajas de *S. cerevisiae* incrementaron significativamente el consumo de materia seca y la ganancia diaria de peso en comparación con testigos sin levadura, atribuyendo este efecto a la mejora en los parámetros de fermentación ruminal y a una mayor estabilidad del pH en el rumen.

El mecanismo subyacente radica en la capacidad de los productos de fermentación de *S. cerevisiae* para favorecer el crecimiento de bacterias fibrolíticas como *Ruminococcus* y *Fibrobacter succinogenes*, lo que acelera la degradación de la fibra y amplía la disponibilidad de ácidos grasos volátiles como principal fuente energética para el animal [4]. Adicionalmente, la presencia de metabolitos secundarios generados durante la fermentación aeróbica—incluyendo vitaminas del complejo B, aminoácidos libres y compuestos bioactivos— puede ejercer efectos positivos sobre la integridad del epitelio ruminal y la eficiencia de absorción de nutrientes [11].

Producción de leche en vacas

En los primeros días del ensayo la producción láctea entre tratamientos no presentó variación estadística ($p \geq 0.05$), lo que ratificó las condiciones homogéneas de partida. A partir del día 30 emergieron diferencias altamente significativas ($p < 0.001$) que se mantuvieron de forma consistente. La producción promedio en T1 a los 60 días alcanzó 14.53 ± 0.19 L/vaca/día, frente a 12.50 ± 0.13 L en T2 y 10.13 ± 0.28 L en T3. Esta tendencia se sostuvo a los 90 días (14.03 ± 0.25 , 12.02 ± 0.22 y 9.72 ± 0.21 L, respectivamente) y hasta el final del periodo (Figura 2).

Los valores obtenidos en T1 son coherentes con los reportados por Polyorach et al. [6], quienes documentaron incrementos en la producción de leche de vacas Thai crossbred Holstein-Friesian con 200 mL/día de suplemento líquido fermentado, atribuyendo el efecto a una mayor digestibilidad de carbohidratos estructurales y no estructurales, así como a la acción moduladora de levaduras y bacterias ácido-lácticas sobre la fermentación ruminal y la absorción intestinal de nutrientes. En línea con estos hallazgos, el fermentado aeróbico evaluado en el presente estudio habría promovido una mejora en la digestibilidad de la materia seca de aproximadamente 9%, cifra que se enmarca dentro del rango de 8 a 10% documentado en la literatura especializada para este tipo de suplementos [12].

Desde una perspectiva nutricional, el análisis bromatológico del fermentado aeróbico reveló un alto contenido de proteína cruda, fibra detergente neutro y energía metabolizable, atribuibles en parte a los cambios bioquímicos inducidos por la fermentación, que incrementan la disponibilidad de nitrógeno no proteico y degradan parcialmente la pared celular vegetal liberando compuestos aprovechables por los microorganismos del rumen. Resultados similares han sido reportados para subproductos agroindustriales fermentados con *S. cerevisiae* en sistemas tropicales de lechería [6], lo que refuerza la hipótesis de que la levadura actúa como un potenciador de la fermentación ruminal más que como un sustituto proteico directo.

Respecto al sistema silvopastoril empleado como base de producción, Bustamante-Castañeda et al. [3] señalan que la combinación de pastoreo con estrategias de suplementación orientadas a corregir deficiencias nutricionales específicas, particularmente de proteína y energía, es la ruta más efectiva para incrementar la productividad en sistemas de doble propósito en el trópico americano. La suplementación con fermentado aeróbico representa una aproximación coherente con este principio: actúa como complemento proteico-energético que potencia el aprovechamiento del forraje base sin sustituirlo.

Análisis económico-productivo

La evaluación económica evidenció ventajas claras de la suplementación con fermentado aeróbico sobre el alimento comercial (Tabla 2). El costo de producción del fermentado aeróbico fue de \$4.80 MXN/kg de materia fresca, considerablemente inferior a los \$12.50 MXN/kg del alimento comercial utilizado en T2. Al calcular el costo por litro de leche adicional producida respecto al testigo (T3), T1 presentó un costo de \$0.92 MXN/L adicional frente a \$2.87 MXN/L en T2, lo que representa una ventaja económica de 68% a favor del fermentado aeróbico. En términos de ganancia de peso en becerros, el costo por kilogramo adicional de ganancia fue de \$18.40 MXN en T1 versus \$38.60 MXN en T2.

Tabla 2. Comparativo económico por tratamiento durante el periodo experimental de 120 días.

Variable	T1 (Fermentado)	T2 (Comercial)	T3 (Testigo)
Costo suplemento (MXN/kg)	4.80	12.50	0
Costo total suplementación (MXN/vaca/120 días)	576	1,500	0
Producción adicional de leche (L/vaca)	512	288	—
Costo por litro adicional (MXN)	0.92	2.87	—
GDP adicional en becerros (kg/día)	0.380	0.230	—
Costo por kg adicional de GDP (MXN)	18.40	38.60	—

La posibilidad de elaborar el fermentado aeróbico con insumos locales —pasto de corte, melaza, urea y levadura disponible en tiendas de insumos agropecuarios— reduce la dependencia de cadenas de suministro externas y confiere resiliencia al sistema productivo ante fluctuaciones en el precio de los concentrados comerciales. Estos resultados son coherentes con los hallazgos de Bustamante-Castañeda et al. [3] y Polyorach et al. [6], quienes señalaron que la suplementación orientada a corregir el balance energético-proteico en sistemas tropicales de doble propósito genera los mayores retornos económicos cuando se apoya en insumos locales de bajo costo, aspecto especialmente relevante en el contexto actual de volatilidad en los precios de los insumos agropecuarios.

Trabajo a futuro

Los resultados de este estudio sientan las bases para una agenda de investigación más amplia sobre el uso de fermentados aeróbicos en sistemas ganaderos tropicales. Se recomienda extender el periodo de evaluación más allá de 120 días con el objetivo de caracterizar los efectos acumulativos sobre la condición corporal, la eficiencia reproductiva y la salud general de los animales. Asimismo, resulta pertinente explorar diferentes concentraciones de levadura, fuentes de nitrógeno y materias primas locales para optimizar la formulación del fermentado en función de las condiciones de cada unidad de producción.

Desde la perspectiva microbiana, se sugiere incorporar análisis de la microbiota ruminal mediante técnicas de secuenciación de nueva generación (NGS), lo que permitiría esclarecer los mecanismos de acción del fermentado sobre las comunidades bacterianas y fúngicas del rumen, así como cuantificar su impacto en la producción de metano entérico, un aspecto cada vez más relevante en el contexto de la ganadería sostenible y la mitigación del cambio climático. Finalmente, se propone realizar estudios comparativos en distintas regiones agroecológicas del trópico mexicano para determinar la transferibilidad y escalabilidad de esta tecnología en diferentes contextos productivos, considerando además el análisis de ciclo de vida del suplemento como herramienta para evaluar su sustentabilidad ambiental integral.

Conclusiones

La suplementación con fermentado aeróbico mejoró de manera significativa los indicadores productivos de bovinos de doble propósito bajo condiciones de pastoreo tropical en el sur de Veracruz, posicionándose como la estrategia más eficiente en comparación con el alimento comercial y el pastoreo convencional. Los incrementos en producción de leche y ganancia de peso observados en T1 son atribuibles a una mejora en la digestibilidad de la materia seca y a la modulación positiva de la microbiota ruminal mediada por *Saccharomyces cerevisiae*, mecanismos que han sido confirmados por diversas investigaciones en sistemas tropicales [4, 5, 6].

El análisis bromatológico del fermentado aeróbico demostró que el proceso de fermentación mejora sustancialmente el perfil nutritivo del forraje base, con incrementos notables en proteína cruda y energía metabolizable, así como reducción en la fracción fibrosa, lo que explica en parte la mayor respuesta productiva de los animales suplementados con este producto.

El fermentado aeróbico se distingue por ser elaborable con insumos locales de bajo costo, lo que lo convierte en una opción técnica y económicamente viable para pequeños y medianos productores. El análisis económico confirma una ventaja de hasta 68% en el costo por litro de leche adicional respecto al alimento comercial. Su incorporación dentro de estrategias de suplementación estratégica contribuye a reducir la brecha nutricional durante épocas críticas del año, optimizando la rentabilidad de los sistemas ganaderos tropicales sin incrementar significativamente los costos de producción.

Referencias

- [1] C. S. Galina y M. Geffroy, "Dual-purpose cattle raised in tropical conditions: what are their shortcomings in sound productive and reproductive function?" *Animals*, vol. 13, no. 13, p. 2224, 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13132224>
- [2] SIAP, *Estadística de producción ganadera bovina, México*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2022.
- [3] B. S. Bustamante-Castañeda, L. E. Rodríguez-Hernández, P. A. Méndez-Santos, A. Ferlay-Aldana, M. A. Mejía-Sánchez, L. J. Jaimes-Cruz y J. M. Cerón-Alzate, "Effect of dietary supplementation on milk nutrient deposition and enteric methane emission in dual-purpose cows from the Colombian Amazon," *Animals*, vol. 15, no. 24, p. 3542, 2025. <https://doi.org/10.3390/ani15243542>
- [4] K. Phesatcha, B. Phesatcha, M. Wanapat y A. Cherdthong, "Roughage to concentrate ratio and *Saccharomyces cerevisiae* inclusion could modulate feed digestion and in vitro ruminal



- fermentation," *Veterinary Sciences*, vol. 7, no. 4, p. 151, 2020.
<https://doi.org/10.3390/vetsci7040151>
- [5] L. Xue, S. Zhou, D. Wang, F. Zhang, J. Li y L. Cai, "The low dose of *Saccharomyces cerevisiae* is beneficial for rumen fermentation (both in vivo and in vitro) and the growth performance of heat-stressed goats," *Microorganisms*, vol. 10, no. 10, p. 1877, 2022.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10101877>
- [6] S. Polyorach, R. Nampukdee, M. Wanapat, S. Kang, A. Cherdthong, O. Pongchompu y T. Norrapoke, "Microbial fermented liquid supplementation improves nutrient digestibility, feed intake, and milk production in lactating dairy cows fed total mixed ration," *Animals*, vol. 13, no. 5, p. 933, 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13050933>
- [7] FAO, *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2023-2024*. CEPAL-FAO-IICA, San José, Costa Rica, 2023.
- [8] INEGI, *Encuesta Nacional Agropecuaria 2022*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, 2023.
- [9] CONAGUA, *Datos climatológicos del estado de Veracruz*. Comisión Nacional del Agua, México, 2024.
- [10] AOAC International, *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 21st ed. AOAC International, Gaithersburg, MD, 2019.
- [11] F. M. Ciriaco, D. D. Henry, T. M. Schulmeister, C. D. Sanford, L. B. Canal, P. L. P. Fontes y N. DiLorenzo, "Effects of a liquid and dry *Saccharomyces cerevisiae* fermentation product feeding program on ruminal fermentation, total tract digestibility, and plasma metabolome of Holstein steers receiving a grain-based diet," *Journal of Animal Science*, vol. 100, no. 2, p. skab366, 2022. <https://doi.org/10.1093/jas/skab366>
- [12] M. Sholikhah, T. Wahyono y A. Nugroho, "Improvement of digestibility in fermented rations," *Livestock Science*, vol. 275, pp. 105-112, 2024.



Análisis térmico e hidráulico de un intercambiador de calor de tubos y coraza con bafles helicoidales en simulación numérica cfd de jugo de fruta.

Guadalupe Vivar Vera^a, Daniela Arcos Marín^a, Jaime Jiménez Guzmán^a, Osbaldo Hernández Guevara^a, Mayra Viviana Velázquez Macario^a.

^aFacultad de Ciencias Químicas, Región Orizaba-Córdoba, Universidad Veracruzana.

mayvelazquez@uv.mx

Resumen

Se presenta el estudio térmico e hidráulico de un intercambiador de calor de bafles helicoidales (ICBH) mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Se determinó de forma numérica el comportamiento de la transferencia de calor, de presión y de velocidad a lo largo del intercambiador. Los resultados numéricos del coeficiente convectivo de transferencia de calor, los números de Nusselt y las caídas de presión a diferentes números de Reynolds fueron analizados en el contexto del procesamiento de alimentos, mostrando una buena concordancia con los datos experimentales de la literatura para la pasteurización de jugo de fruta.

Palabras clave: *Intercambiador de calor de tubos y coraza ICBH; Bafles helicoidales; Coeficiente convectivo de transferencia de calor h.*

Introducción

La aplicación de los principios de transferencia de calor al diseño de Intercambiadores de Calor (IC) a fin de lograr ciertos objetivos ingenieriles es de extrema importancia. Principalmente se pretende alcanzar varias metas encaminadas al desarrollo de un producto que presente beneficios tanto económicos como ambientales. Estos aspectos se deben tener en cuenta para los nuevos diseños, debiendo considerar variables económicas como son: el peso, el tamaño, los materiales, etc. [1].

La búsqueda de alternativas para el mejoramiento del desempeño de IC ha conducido a aprobar nuevas geometrías como los bafles de forma helicoidal desarrollado por primera vez en Checoslovaquia, llamados “*helixchanger*” [2]. Las ventajas de los intercambiadores de calor con bafles helicoidales van más allá de los aspectos térmicos e hidráulicos, ayudan a resolver problemas de operaciones como el ensuciamiento, así como la reducción de zonas muertas, de estancamiento y la prevención de vibración inducida por el flujo. Además, presentan coeficientes de transferencia de calor más grandes que resultan en un mejor desempeño térmico [3]. Los intercambiadores de calor de bafles helicoidales presentan mayor eficiencia en el proceso de transferencia de calor, menores caídas de presión reflejadas en la reducción de costos en el proceso, reducción en las zonas muertas y de estancamiento. Si bien diversos estudios han reportado mejoras en el desempeño termo-hidráulico de esta geometría en aplicaciones de los sectores energético y petroquímico, su análisis específico en procesos alimentarios, particularmente en la pasteurización de fluidos no newtonianos como la pulpa de mango, ha sido escasamente abordado, lo que representa un vacío relevante en la literatura científica. por ejemplo la elaboración de jugos donde las pulpas de fruta presentan partículas en suspensión que pueden impedir que haya una transferencia de calor efectiva, por lo que este trabajo se enfoca al análisis de la transferencia de calor y el comportamiento hidráulico de un intercambiador de calor de tubos y coraza con bafles helicoidales a diferentes números de Reynolds, utilizando datos teóricos de las propiedades fisicoquímicas de pulpa de mango mediante simulación numérica usando técnicas de CFD. La elección del intercambiador de calor es importante para garantizar la eficiencia del proceso, la seguridad microbiológica y la calidad del producto durante la pasteurización de pulpas de fruta. Aunque los intercambiadores de placas y los de coraza y tubos convencionales han sido utilizados con buenos resultados en el procesamiento de fluidos homogéneos y de baja viscosidad (como los jugos clarificados), su aplicación en el tratamiento térmico de pulpas viscosas con comportamiento

reológico no newtoniano (como la pulpa de mango) presenta limitaciones. Su elevada viscosidad y alto contenido de sólidos suspendidos dificultan el flujo y la transferencia de calor (Jara Ponce, 2025).

Metodología

En este estudio se utilizó la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para analizar el comportamiento térmico e hidrodinámico lado coraza, de la pasteurización de pulpa de mango en un intercambiador de calor de coraza y tubos con deflectores helicoidales (ICBH). La simulación se realizó en el software ANSYS Fluent.

El fluido de trabajo fue pulpa de mango (*Mangifera indica L.*, variedad *Tommy Atkins*). Sus propiedades fisicoquímicas se obtuvieron de la literatura científica especializada (Pierre-Noël-Gilles et al., 2021), con un contenido aproximado de 18 °Brix. Estas propiedades fueron determinadas experimentalmente en un rango de temperaturas representativo de procesos térmicos y se consideran adecuadas para simular condiciones típicas de pasteurización en la industria alimentaria.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la pulpa de mango, adaptados de: “Heat transfer analysis during hydrothermal treatment of mango” por Pierre-Noel-Gilles, et al. (2021).

Propiedad	Símbolo/ Unidad	Valor experimental
Densidad	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	1034
Calor específico	$C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$	2589
Conductividad térmica	$k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	0.614
Viscosidad aparente	$\eta_a \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$	0.38

La Tabla 1 presenta las propiedades fisicoquímicas empleadas en la simulación numérica del intercambiador de tubos y coraza con baffles helicoidales.

Para el desarrollo de las simulaciones se establecieron condiciones de operación a diferentes velocidades de entrada, correspondientes a distintos números de Reynolds. Fijando la temperatura del proceso a 75 C. Las simulaciones se realizaron hasta alcanzar los criterios de convergencia, evaluada mediante la estabilidad de las variables principales del sistema. Una vez lograda la convergencia, los datos se procesaron mediante herramientas de post-procesamiento de ANSYS Fluent, evaluando detalladamente el comportamiento térmico e hidráulico del fluido del lado de la coraza en un ICBH.

Resultados

El comportamiento térmico e hidráulico del intercambiador se evaluó mediante 17 simulaciones numéricas. Las condiciones de entrada se definieron en función de la velocidad del fluido, de un rango de números de Reynolds entre 20 y 1600, lo que abarca desde flujos a baja

velocidad hasta las condiciones de operación más severas dentro del régimen analizado. La Tabla 2 resume la relación entre la velocidad de entrada y el número de Reynolds para cada simulación.

Tabla 2. Velocidad del fluido como condición de entrada para las simulaciones numéricas.

Número de Reynolds	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds	Velocidad (m/s)
20	0.017	500	0.44
30	0.02	600	0.53
40	0.03	700	0.66
50	0.04	800	0.70
100	0.08	900	0.79
150	0.13	1000	0.88
200	0.17	1200	1.06
300	0.26	1500	1.32
400	0.35	1600	1.41

Análisis térmico.

Se evaluó el comportamiento térmico del sistema en función del coeficiente de transferencia de calor por convectivo, h , para las 17 simulaciones numéricas estudiadas. En la Figura 1 se presenta la tendencia de h , respecto al número de Reynolds (Re). Se observa que a valores bajos de Re (entre 20 y 50), el coeficiente convectivo es reducido debido al predominio del régimen laminar y las bajas velocidades del fluido. Al incrementar el Re a 100, se aprecia un aumento notable en el valor de h , tendencia que incrementa en el intervalo de Re entre 200 y 400.

No obstante, a partir de $Re = 500$, el coeficiente h presenta una ligera disminución y, posteriormente, el comportamiento térmico tiende a estabilizarse de manera asintótica en las simulaciones de mayor velocidad. Este comportamiento particular a números de Reynolds más altos puede atribuirse a la alta viscosidad de la pulpa de mango y a la hidrodinámica inducida por los baffles helicoidales, la cual estabiliza el perfil térmico del fluido del lado de la coraza.

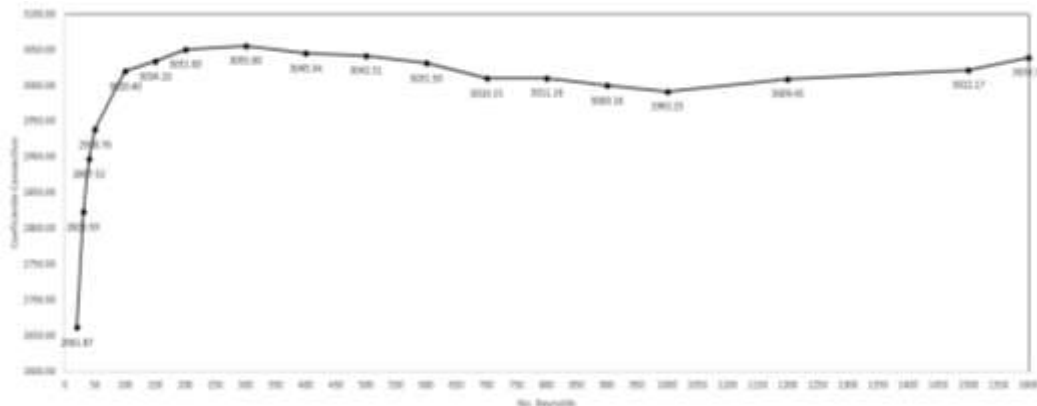
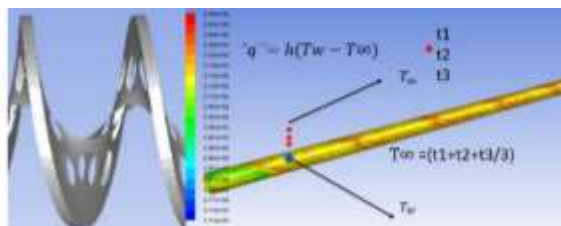


Figura 1. Comportamiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor h , lado coraza para diferentes números de Reynolds.

Distribución de temperatura y número de Nusselt.

La distribución de temperatura en el ICBH se determinó mediante la evaluación del perfil térmico global del fluido a lo largo del lado de la coraza, prestando especial atención a la zona adyacente a la superficie externa de los tubos, donde ocurre el mayor gradiente térmico. A partir de estos perfiles de temperatura, se calculó el número de Nusselt local y promedio para conocer cuantitativamente la eficiencia de la transferencia de calor por convección en función de las condiciones hidrodinámicas.

Figura 2. Temperatura en la pared T_w y temperatura lejana T_∞ de uno de los tubos a un número de Reynolds en el ICBH, lado coraza.



Con base en el análisis previo, se seleccionaron las tres simulaciones que presentaron el mejor desempeño térmico, correspondientes a los números de Reynolds de 200, 300 y 400. Los números de Nusselt promedio obtenidos para estos tres casos se presentan en la Tabla 3. Este parámetro adimensional se calculó a partir de los valores promedio del coeficiente de transferencia de calor por convección h obtenidos en cada simulación; para ello, se consideró como longitud característica el diámetro externo del tubo y las propiedades térmicas de la pulpa de mango como fluido de trabajo. La presencia de los baffles helicoidales induce un flujo en espiral que promueve una distribución de temperatura más uniforme a lo largo del equipo, lo que permite reducir significativamente las zonas muertas térmicas y optimizar el aprovechamiento de las áreas de transferencia de calor.

Tabla 3. Numero de Nusselt para las simulaciones que presentan mejores resultados.

Re	Velocidad (m/s)	Nusselt
200	0.1771	206.2
300	0.2656	206.5
400	0.3542	205.8

Para un número de Reynolds de 200, se obtuvo una tasa de transferencia de calor global de 46 242.48 W, lo que representa un nivel intermedio de desempeño dentro del rango analizado. Bajo esta condición, el sistema exhibió una transferencia de calor significativa. Al incrementar el número de Reynolds a 300, la tasa de transferencia de calor global aumentó a 70 696.70 W, resultando en una mejora importante del desempeño térmico. Finalmente, para un número de Reynolds de 400,

la tasa alcanzó los 95 493.69 W, demostrando que el sistema continúa incrementando su capacidad de transferencia térmica conforme aumenta el régimen de flujo. Estos resultados evidencian que el incremento del número de Reynolds genera un aumento progresivo y consistente en la tasa de transferencia de calor, confirmando la estrecha dependencia entre el desempeño térmico del intercambiador y el régimen hidrodinámico en este intervalo.

Análisis hidráulico- caída de presión

La caída de presión en el lado de la coraza se determinó a partir de la diferencia entre la presión estática de entrada y la presión de salida del fluido, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\Delta P = P_{entrada} - P_{salida}$$

Donde $P_{entrada}$ y P_{salida} corresponden a las presiones promedio obtenidas mediante simulación CFD para cada condición de operación.

Tabla 4. Caída de presión en función del número de Reynolds

Número de Re	Presión entrada	Presión salida	ΔP
200	41,715 Pa	2,652 Pa	39,062
300	68,072 Pa	3,615 Pa	64,457
400	97,849 Pa	5,113 Pa	92,736

La Tabla 4 muestra los resultados del comportamiento de la caída de presión en función del incremento del número de Reynolds. Para un número de Reynolds de 200, la caída de presión obtenida fue de 39,062 Pa, lo que representa un nivel intermedio de pérdida de carga dentro del sistema. Al aumentar el número de Reynolds a 300, la caída de presión se incrementó hasta 64,457 Pa; este comportamiento se asocia directamente con un mayor requerimiento energético para mantener el flujo del fluido a través de la geometría helicoidal. Finalmente, para un número de Reynolds de 400, la pérdida de presión alcanzó los 92,736 Pa, confirmando que las pérdidas de carga se incrementan a medida que el régimen hidrodinámico se intensifica. Este incremento en la velocidad eleva el consumo de potencia asociado al bombeo, por lo tanto resalta la necesidad de evaluar de forma conjunta el beneficio térmico y el costo energético del sistema.

Conclusiones

El presente trabajo permitió evaluar el comportamiento térmico e hidráulico de un intercambiador de calor con baffles helicoidales, evidenciando la influencia geométrica flujo-térmica dentro del sistema. Los resultados obtenidos muestran que la incorporación del baffle helicoidal favorece la distribución del fluido, mejorando las condiciones de transferencia de calor, esto se refleja en valores elevados de coeficiente convectivo y en un comportamiento estable del número de Nusselt, en el intervalo de Reynolds entre 200 y 400, bajo el rango de condiciones de operación establecidas en los casos de estudio analizados.

Asimismo, se determinó que el incremento del número de Reynolds permite aumentar el coeficiente de transferencia de calor; sin embargo, este beneficio se acompaña de un incremento considerable en la caída de presión. Tal comportamiento evidencia un compromiso entre el desempeño térmico y el consumo energético, resaltando la necesidad de optimizar las condiciones de operación para lograr un balance adecuado entre ambos parámetros.



En cuanto a su aplicación en la ingeniería de alimentos, el análisis realizado indica que el desempeño global del sistema depende de la interacción entre las condiciones operativas, la configuración geométrica y las propiedades reológicas del fluido (en este caso, pulpa de mango). Se concluye que el intercambiador de calor con baffles helicoidales constituye una alternativa tecnológica viable para su implementación en procesos térmicos industriales, específicamente en la pasteurización orientada a la inactivación microbiana de fluidos de alta viscosidad.

Los hallazgos en este trabajo establecen una base sólida para el desarrollo de futuras investigaciones enfocadas en el comportamiento térmico e hidráulico de la pulpa de mango durante su pasteurización. Asimismo, abren la pauta para evaluar diversas condiciones de operación orientadas a maximizar el rendimiento y la eficiencia térmica de los intercambiadores de calor de coraza y tubos con baffles helicoidales. El enfoque numérico y experimental, en esta investigación, sienta un precedente para optimizar el procesamiento térmico industrial de otros fluidos no newtonianos de alta relevancia en la industria alimentaria.

Referencias bibliográficas

- [1] Araujo, C. D., Rincón, J. A., Materano, G. I., & Colman, A. A. (2008). "Computational simulation of fluid flow by using element based finite volume method on unstructured grids". *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 31(1), 13-20. 2008.
- [2] Lutcha, J., Necansky Performance improvement of tubular heat exchangers by Helical baffles. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 68 263-270, 1990.
- [3] Azad, M., & Amidpour, M.. *Advanced Heat Exchanger Technology: Innovations for Energy Efficiency*. Springer International Publishing(2021).



Bebida Fermentada De Tuna (*Opuntia Ficus-Indica*) Por Bacterias Aisladas Del Jengibre (*Zingiber Officinale*)

J. A. Reyes Larrazábal¹, M. Ponce Acevedo¹, V. Lara Martínez¹, H. E. Romero Luna¹, G. Vivar Vera^{1*}, M. V. Velázquez Macario¹, J. Jiménez Guzmán^{1*}.

¹Facultad de Ciencias Químicas, Región Orizaba-Córdoba, Universidad Veracruzana, Oriente 6, Rafael Alvarado, Orizaba, Ver., México.

[*jaijimenez@uv.mx](mailto:jaijimenez@uv.mx)

Artículo científico

Resumen—Se desarrolló una bebida fermentada funcional a partir de jugo de tuna (*Opuntia ficus-indica*) utilizando un inóculo natural de jengibre (*Zingiber officinale*). El objetivo fue evaluar el impacto de la inclusión de la cáscara comparando dos formulaciones: F1 (solo pulpa) y F2 (pulpa con cáscara). Tras 24 h de fermentación, la fórmula F1 resultó óptima, presentando un pH de 4.18, acidez de 0.228% y 11.33 °Brix. El análisis sensorial mediante escala hedónica reveló que F1 obtuvo la mayor aceptabilidad ($p < 0.05$), destacando por su textura fluida, homogeneidad y menor astringencia en comparación con F2. Se concluye que el uso de microorganismos del jengibre permite transformar la tuna en una bebida funcional viable, aprovechando un recurso nativo con una calidad organoléptica aceptable.

Introducción

Las bebidas funcionales han experimentado un crecimiento significativo debido a la demanda de alimentos que, además de nutrir, aporten beneficios específicos a la salud, como la eliminación de radicales libres y la prevención de enfermedades cardiovasculares (Ticsihua Huaman & Orejon Montalvo, 2022). Un recurso clave para este desarrollo es la tuna (*Opuntia ficus-indica*), una cactácea de gran importancia agronómica nativa de México, país que se posiciona como su principal productor mundial (Atarama-Del-Pozo et al., 2026). La tuna destaca por su contenido de fibra, antioxidantes y pigmentos como las betalainas, presentes tanto en la pulpa como en la cáscara (Mena et al., 2018; Parada-Rivera et al., 2021).

Para potenciar estas propiedades, la fermentación se presenta como un proceso biotecnológico esencial que permite degradar metabolitos y generar aromas agradables que mejoran la calidad sensorial del producto final (Palacios-Ruiz et al., 2025). En este contexto, el jengibre (*Zingiber officinale*) no solo aporta compuestos bioactivos como gingeroles y terpenos, sino que sirve como fuente de un inóculo natural conocido como "ginger bug". Esta microflora característica está compuesta principalmente por bacterias de las familias *Lactobacillaceae* y *Acetobacteraceae*, además de levaduras de las familias *Pichiaceae* y *Saccharomycodaceae*, las cuales dirigen procesos fermentativos que armonizan el perfil de sabor mediante la producción de ácidos orgánicos y ésteres volátiles (Iara Gomes de Oliveira et al., 2024). Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una bebida fermentada funcional a partir de jugo de tuna (*Opuntia ficus-indica*), utilizando microorganismos aislados del jengibre (*Zingiber officinale*) como inóculo natural, y evaluar el efecto de la inclusión de la cáscara (comparando las formulaciones F1 y F2) sobre sus parámetros fisicoquímicos y su aceptabilidad sensorial.

Metodología

Diseño Experimental

Se utilizó un diseño de un factor con dos niveles que corresponde n al modo de preparación del jugo de tuna a fermentar, en el cual se denominaran como formulaciones, en la primera se utilizó únicamente la pulpa del fruto de tuna (F1), mientras que en la segunda se utilizó el fruto completo incluyendo la cáscara (F2).

El proceso general para la elaboración de la bebida fermentada de tuna se estructuró en tres etapas principales: obtención del consorcio microbiano a partir de jengibre, aislamiento de bacterias ácido-lácticas (BAL) y la preparación y fermentación de la matriz de tuna (Figura 1).

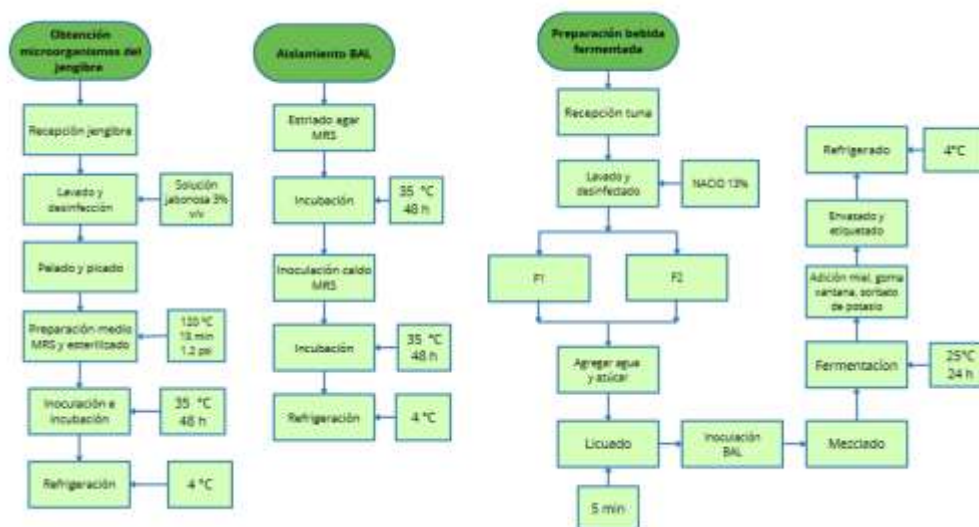


Figura 1. Diagrama de proceso de elaboración de la bebida fermentada de tuna.

Obtención y aislamiento de los microorganismos

El jengibre (*Zingiber officinale*) fue adquirido en un mercado local de la región de Palmira (Mariano Escobedo, Veracruz, México). Para la preparación del cultivo iniciador, se modificó la metodología propuesta por Cabou (2025) y Sánchez & Tromps (2014) enfocándola hacia el aislamiento de bacterias ácido-lácticas (BAL). Inicialmente, los rizomas se lavaron y enjuagaron con agua potable y una solución jabonosa al 3 % (v/v). Posteriormente, se cortaron rodajas uniformes hasta obtener una muestra de 50 g, la cual se transfirió a un medio selectivo compuesto por caldo Man, Rogosa y Sharpe (MRS), sustituyendo la solución convencional de agua y azúcar. La mezcla se incubó en condiciones de anaerobiosis a 35 °C durante un periodo de 24 a 48 h hasta evidenciar turbidez en el medio.

Tras la incubación, se tomó una alícuota del cultivo previo y se realizó un estrido por agotamiento en placas de Petri con agar MRS, las cuales fueron incubadas a 35 °C por 48 h. Finalmente, las colonias aisladas se inocularon en tubos de cultivo con caldo MRS y se incubaron bajo las mismas condiciones (35 °C por 48 h). Una vez alcanzada la temperatura ambiente, los tubos se almacenaron en refrigeración a 4 °C para su posterior uso en la fermentación.

Selección y acondicionamiento del material vegetal

Las tunas (*Opuntia Ficus-Indica*) se obtuvieron en estado fresco y con punto de madurez óptimo en un mercado local en la región de Orizaba, Veracruz. Para su lavado y desinfección se lavaron bajo una corriente de agua potable y se desinfectaron por inmersión en una solución al 13 % de hipoclorito de sodio por 2 min basado en el procedimiento de Ticsihua Huaman & Orejon Montalvo (2022), posteriormente se enjuagaron y secaron para eliminar restos del desinfectante con agua potable.

Preparación del jugo (sustrato)

El sustrato para ambas formulaciones fue preparado mediante extracción de la pulpa y pelado retirando con cuidado espinas superficiales, se cortaron en piezas uniformes y se homogeneizó la fruta con agua potable y azúcar por 3 minutos seguido de un filtrado de los sólidos restantes con una tela y un colador. La proporción de los componentes fue de acuerdo a una presentación en 1 litro, incluyendo los aditivos y estabilizantes (Tabla 1). Se envasó el jugo en unos recipientes de vidrio de 1000 ml debidamente esterilizados.

Tabla 1. Formulación porcentual base para la preparación del jugo de tuna (*Opuntia ficus-indica*).

Componente	%
Tuna (F1, F2)	25.5
Azúcar	1.5
Agua	64
Miel	8
Goma Xantana	0.3
Sorbato De Potasio	0.08
Suma	100

Fermentación del jugo

El jugo de tuna previamente preparado se inoculó con 0.5 mL del cultivo aislado. Tras una homogenización inicial, la mezcla se fermentó a una temperatura controlada de 25 °C durante 24 h en envases de vidrio con cierre hermético. Posteriormente, se adicionaron los estabilizantes y conservadores (goma xantana al 0.3% y sorbato de potasio grado alimentario al 0.08%, junto con miel de abeja como agente acidulante para mejorar la estabilidad y el perfil sensorial del producto. Finalmente, la bebida se homogenizó nuevamente para garantizar la uniformidad y completa dispersión de todos los ingredientes.

Evaluación sensorial

Los atributos sensoriales (color, olor, textura, sabor y aceptación) de las bebidas fermentadas de tuna (*Opuntia Ficus-Indica*) se evaluaron mediante una prueba afectiva con escala hedónica de 9 puntos propuesta por Ramírez-Navas (2012) a un total de 20 panelistas no entrenados con un intervalo de 19 a 56 años.

Análisis fisicoquímicos

Densidad. Se midió la densidad con hidrómetro FastRack de triple escala de acuerdo a la metodología propuesta por Oliveira et al. (2013).

Sólidos solubles (°Brix). Para la medición de los sólidos solubles se realizó siguiendo la metodología recomendada por Silva (2013) utilizando un refractómetro de campo SK-RF013BX.

Acidez (%). Se midió la acidez mediante titulación ácido-base con NaOH 0.1 N, se expresó en porcentaje de acidez de ácido cítrico siguiendo el método de Jumbo et al. (2024).

pH. Se determinó el con un potenciómetro HI2210 de HANNA siguiendo la metodología de Ledezma (2020).

Declaración nutrimental (cálculo teórico) y etiquetado del producto.

Para la obtención de la información nutrimental de la bebida fermentada, se realizó mediante la consulta en la literatura sobre la composición proximal de cada ingrediente por cada 100 g, posteriormente se determinó la proporción de cada ingrediente para hacer un total (100 %) de acuerdo al peso neto determinado para su presentación y expresándose cada ingrediente a su fracción porcentual, obteniéndose el total de cada nutriente multiplicando su porción por 100 gramos por la fracción del ingrediente y se sumó. Para el redondeo y ajuste de los datos calculados se hizo en base a la NOM-051-SCFI/SSA1-2010 (Secretaría de Economía & Secretaría de Salud, 2010), así como el diseño de la etiqueta del producto.

Análisis estadístico

Los datos recolectados se procesaron con Excel de Microsoft Corporation para la creación de la base de datos y la generación de los gráficos. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza de 95% ($\alpha = 0.05$), y se realizó la prueba de Tukey HSD ($p < 0.05$) para determinar diferencias significativas entre las formulaciones F1 y F2 en R-Studio (versión de R 4.4.2).

Resultados y discusión

Análisis Sensorial

Se realizó el análisis sensorial de las dos formulaciones de la bebida fermentada de tuna (*Opuntia ficus-indica*) a 20 panelistas no entrenados, midiendo los atributos de color, olor, sabor, textura y aceptación general. Las escalas de puntuación fueron del 1 al 9. En la Figura 2 se presentan los promedios de la evaluación sensorial mediante escala hedónica. La F1, elaborada exclusivamente con jugo de pulpa, obtuvo las puntuaciones más altas en todos los atributos evaluados. Se observaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) en los parámetros de Sabor, Consistencia y Aceptación General, donde la F1 superó notablemente a la F2. Mientras que la F1 mantuvo puntajes cercanos a 7 (en una escala de 9), la F2 presentó valoraciones menores (alrededor de 4), especialmente en sabor y aceptación general. Los atributos de Aroma y Color no mostraron diferencias significativas entre ambas formulaciones.

La mayor aceptabilidad de la F1 se asocia a que presentó un menor amargor y astringencia, además de una textura más fluida y homogénea en comparación con la F2, la cual incluía cáscara. Esta preferencia coincide con lo reportado por Palacios-Ruíz et al. (2025), quienes señalan que el uso de procesos fermentativos controlados permite degradar metabolitos que generan notas terrosas o astringentes indeseadas, mejorando la calidad sensorial.

La armonización del perfil de sabor en la bebida se atribuye al uso del inóculo de jengibre. Según Gomes de Oliveira et al. (2024), la microflora del "ginger bug" (bacterias lácticas y levaduras) es

capaz de producir ésteres volátiles y alcoholes que aportan notas afrutadas y florales, las cuales son determinantes para la percepción positiva del consumidor. En contraste, la inclusión de la cáscara en la F2 aportó una mayor carga de fibra y posiblemente polifenoles que, aunque valiosos nutricionalmente, suelen ser penalizados sensorialmente si no se someten a una homogenización industrial adecuada que garantice la fluidez del producto.

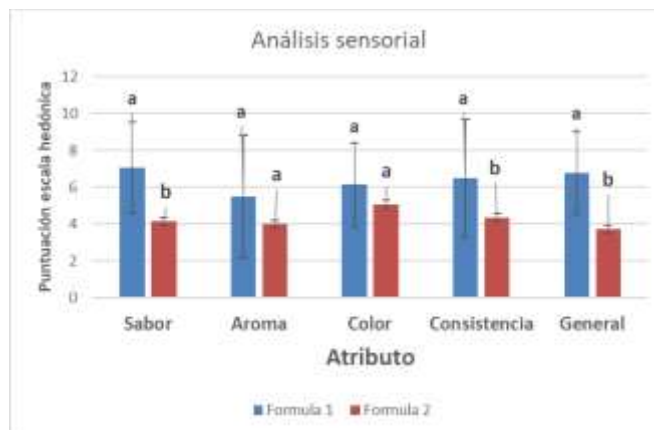


Figura 2. Puntuación promedio de los atributos sensoriales de las formulaciones, Las medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de Tukey.

Pruebas Físicoquímicas

Los parámetros físicoquímicos de las bebidas fermentadas se detallan en la Tabla 2. La F1 presentó un pH de 4.18, una acidez titulable de 0.228% y un contenido de sólidos solubles de 11.33 °Brix. Por su parte, la F2 mostró una tendencia hacia la acidificación con un pH de 3.80, una acidez mayor (0.301%) y sólidos solubles de 12.66 °Brix. La densidad de la bebida final se situó en 0.9730 g/ml para la F1 y 1.0383 g/ml para la F2.

Los valores de pH (4.18) y °Brix (11.33) obtenidos para la F1 son comparables con estudios previos de bebidas a base de *Opuntia*. Ticsihua Huaman & Orejon Montalvo (2022) reportaron un pH de 6.1 y 12.50 °Brix para una bebida de tuna blanca y aguaymanto. La mayor acidez observada en nuestro estudio se explica por el proceso biotecnológico de fermentación, donde los azúcares son metabolizados en ácidos orgánicos (láctico y acético), tal como se observa en la activación del inóculo de jengibre que reduce el pH inicial de 6.17 a 4.20.

Tabla 2. Caracterización físicoquímica de las formulaciones de jugo de tuna fermentado

Parámetro	Formula 1	Formula 2
Densidad g/ml	0.9730±0.0089 ^a	1.0383±0.0447 ^a
°Brix	11.33±0.5773 ^a	12.66±0.5773 ^b
%Acidez	0.2883±0.0015 ^a	0.30156±0.0005 ^b
pH	4.1833±0.0568 ^a	3.8016±0.0436 ^b



La disminución del pH en la Fórmula 2 (3.80) respecto a la F1 confirma que la inclusión de la cáscara acidifica la matriz. Esta tendencia es consistente con lo observado por Atarama-Del-Pozo et al. (2026), quienes determinaron que el pH disminuye conforme aumenta la sustitución por subproductos de cáscara de tuna debido a su naturaleza ácida inherente. Asimismo, los sólidos solubles de la pulpa fresca suelen rondar los 14 °Brix; la reducción a 11.33 °Brix en la bebida final indica un consumo eficiente de sustrato por parte de la microflora activa proveniente del jengibre

Declaración nutrimental y etiqueta del producto

En la Tabla 3 presenta la declaración nutrimental del jugo de tuna fermentado. El producto por 100 ml aporta 213.25 kcal, derivadas principalmente de su contenido de carbohidratos (10.54 g), dentro de los cuales 7.5 g corresponden a azúcares naturales y 1.5 g a azúcares añadidos. El contenido de proteínas, grasas totales, grasas saturadas y grasas trans es nulo de acuerdo a la NOM-051-SCFI/SSA1-2010, al ser redondeado. Asimismo, se observa la presencia de 1 g de fibra dietética y un aporte de sodio de 14 mg aportados por la fruta.

Tabla 3. Declaración nutrimental de la bebida

Nutrimento	Por 100 ml
Contenido energético	42.650 KJ
Proteínas	0 g
Grasas totales	0 g
Grasas saturadas	0 g
Carbohidratos	10.54 gr
Azúcares	7.5 g
Azúcares añadidos	1.5 g
Fibra dietética	1 g
Sodio	14 g

Conclusión

El estudio demuestra que es posible obtener una bebida fermentada funcional de tuna con alta aceptabilidad utilizando microorganismos aislados del jengibre. La Fórmula 1, compuesta únicamente por jugo de pulpa, resultó ser la opción óptima al presentar un mejor equilibrio fisicoquímico (pH 4.18 y 11.33 °Brix) y una calidad sensorial superior en sabor y textura. Este desarrollo no solo aprovecha un recurso nativo de gran valor en México, sino que integra procesos de fermentación natural que mejoran las propiedades organolépticas del producto, posicionándolo como una alternativa saludable y viable para el mercado de bebidas funcionales.

Referencias Bibliográficas

- [1] Atarama-Del-Pozo, J., Bautista-Cruz, N., Díaz-García, A., Almonacid-Román, R. D., Gutiérrez-Elescano, P. I., & Arias-Arroyo, G. (2026). Inclusion of purple prickly pear (*Opuntia ficus - indica* (L.) Miller) peel flour in the development of a high-fiber bread with high sensory acceptability. *Food and Humanity*, 6, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2026.101134>
- [2] Cabou, P. (2025). *Guía Básica del Bicho de Jengibre*. <https://paulinacabou.com/wp-content/uploads/2025/04/Guia-Bicho-de-Jengibre.pdf>



- [3] Jumbo, L. D. J., Tenezaca, C. M. C., Parco, S. P. V., & Vargas, G. M. C. (2024). Determinación de la Acidez Titulable en Cítricos Amazónicos: Correlación con la Madurez y la Susceptibilidad a la Pudrición. *Ciencia Latina: Revista Multidisciplinar*, 8(2), 2441-2451.
- [4] Iara Gomes de Oliveira, L., Karoline Almeida da Costa, W., de Candido de Oliveira, F., França Bezerril, F., Priscila Alves Maciel Eireli, L., dos Santos Lima, M., Fontes Noronha, M., Cabral, L., Wagner, R., Colombo Pimentel, T., & Magnani, M. (2024). Ginger beer derived from back-slopping: Volatile compounds, microbial communities on activation and fermentation, metabolites and sensory characteristics. *Food Chemistry*, 435, 137640. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137640>
- [5] Ledezma, H. F. H. (2020). Disminución del pH salival por consumo de bebidas ácidas, factor coadyuvante en la biocorrosión dental. *Odontología Actual*, 5(6), 9-20.
- [6] Mena, P., Tassotti, M., Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Legua, P., Del Rio, D., & Hernández, F. (2018). Phytochemical characterization of different prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) cultivars and botanical parts: UHPLC-ESI-MSn metabolomics profiles and their chemometric analysis. *Food Research International*, 108, 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.062>
- [7] Oliveira, B. de M., Melo Filho, J. M., & Afonso, J. C. (2013). A densidade e a evolução do densímetro. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35(1), 1–10. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172013000100024>
- [8] Palacios-Ruiz, V., Suárez-Quiroz, M. L., Figueroa-Hernández, C. Y., Hernández-Estrada, Z. J., & González-Ríos, O. (2025). Influencia del uso de levaduras en la fermentación de la pulpa de café sobre su calidad aromática y sensorial. *Biotecnia*, 27, e2244. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27.2244>
- [9] Parada-Rivera, M. M., Godoy-Ponce, S. C., Carrera-Beltrán, L. C., Tapia-Borja, A. I., & Chávez Echeverría, D. G. (2021). Diseño sostenible de un proceso industrial local para la obtención de una bebida hidratante de hoja de tuna. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 11(1), 40–49. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.3097>
- [10] Ramírez-Navas, J. S. (2012). Análisis sensorial: pruebas orientadas al consumidor. *Revista ReCiTeIA*.
- [11] Sánchez, L., & Tromps, J. (2014). Caracterización in vitro de bacterias ácido lácticas con potencial probiótico. *Revista de Salud Animal*, 36(2), 124–129.
- [12] Secretaría de Economía & Secretaría de Salud. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados- Información comercial y sanitaria*. Diario Oficial de la Federación. http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4010/seeco11_C/seeco11_C.htm
- [13] Silva, S. (2013). Calibración de refractómetro Brix para la determinación del contenido de Inmunoglobulina G en calostro bovino (Doctoral dissertation, Thesis. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile).
- [14] Ticsihua Huaman, J., & Orejon Montalvo, T. Y. (2022). Evaluación del efecto de concentración en una bebida funcional a partir de tuna blanca (*Opuntia ficus*) y aguaymanto (*Physalis peruviana*). *Revista Alfa*, 6(18), 383–392. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i18.175>



Elaboración de un snack adicionado con harina de camarón liofilizada y fibra de garbanzo

G. Vivar Vera^a, A. Barragán Ramos^a, E. Reyes Martínez^a, M.F. Hernández Guillén^a, C. Hipólito Esspinosa^a, J. Jiménez Guzmán^a.

^a Facultad de Ciencias Químicas, Región Orizaba-Córdoba, Universidad Veracruzana
jajjimenez@uv.mx

Artículo: científico

Resumen

El presente estudio evaluó la elaboración de un snack a partir de harina de camarón (*Litopenaeus vannamei*) obtenida mediante liofilización, complementada con harina de garbanzo, con el objetivo de valorizar subproductos marinos y desarrollar un alimento con alto contenido proteico y adecuada aceptación sensorial. La liofilización se empleó como técnica de deshidratación debido a su capacidad para preservar compuestos bioactivos, calidad nutricional y propiedades fisicoquímicas del camarón. El proceso incluyó lavado, escaldado, congelación con nitrógeno líquido y secado a -51 °C y 0.04 mbar durante 26 horas, seguido de pulverización. Se formuló el snack mediante un diseño factorial 2³, evaluando el tipo de camarón (fresco/congelado), tipo de harina (trigo/papa) y concentración de maltodextrina (0% y 5%). Al producto obtenido se realizó análisis sensorial con panelistas no entrenados, los resultados indicaron que la formulación óptima presentó alta aceptación sensorial, destacando atributos de sabor y textura. Asimismo, mostró baja actividad de agua (0.205 ± 0.012), ausencia de patógenos (*Salmonella* y *Shigella* spp.) y propiedades adecuadas de color y textura, lo que sugiere buena estabilidad y calidad del producto.

Palabras clave: *Liofilización; camarón; snack; evaluación sensorial.*

Introducción

La transformación de mariscos y sus subproductos (cabezas, cáscaras y colas) en harinas o polvos comestibles se ha consolidado como una estrategia práctica para valorizar residuos y obtener ingredientes funcionales. El proceso de deshidratación por liofilización mantiene contenidos proteico importante y concentrado de minerales y compuestos bioactivos, por lo que se han utilizado para fortificar diferentes productos alimenticios (Fotodimas *et al.*, 2024; Jeyakumari *et al.*, 2016). Reportes experimentales muestran que los polvos procedentes de residuos de camarón conservan buena digestibilidad proteica y propiedades sensoriales aceptables cuando se emplean procesos de secado controlados, lo que favorece su incorporación en formulaciones alimentarias para consumo humano (Maulina, Nurwati & Hasdar, 2024). Además, el bajo contenido de agua de la harina facilita su almacenamiento, transporte y uso en matrices secas o rehidratables (Omar *et al.*, 2025). En el presente trabajo se elaboró un snack saludable a base de camarón liofilizado que contiene un alto contenido proteico y bajo aporte calórico, garantizando la conservación de sus propiedades nutricionales y sensoriales, con el fin de ofrecer una alternativa innovadora, inocua y aceptada por los consumidores.

Metodología

Procedimiento

El camarón (*Litopenaeus vannamei*) se lavó bajo el chorro de agua corriente, realizando un corte mariposa para extraer el tracto intestinal del camarón. Se realizó un escaldado en agua caliente para liberar pigmentos. Los camarones se congelaron en N₂ líquido para liofilizar a -51 °C, 0.04 mbar de presión durante 26 horas (Free Zone Benchtotop Freeze Dryer-25-50-Stainless-Steel-North-American, 115 V-standard, Labconco). El camarón deshidratado se pulverizó en un procesador de alimentos (Nutribuling 600W). Para la formulación del snack, se empleó un diseño factorial completo 2³, en el cual se evaluaron tres factores: camarón (congelado y fresco), harina (papa y trigo) y maltodextrina (5% y 0%), generando ocho tratamientos experimentales. Las formulaciones obtenidas se procesaron mediante mezclado, laminado, corte y horneado para la elaboración de chips. Posteriormente, se realizó una evaluación sensorial mediante una encuesta con consumidores no entrenados, con el fin de determinar el nivel de aceptación de cada tratamiento y seleccionar la formulación óptima. A la formulación seleccionada se le realizaron análisis fisicoquímicos, microbiológicos y de textura para evaluar su calidad e inocuidad. Actualmente, se contempla la realización de pruebas adicionales para fortalecer la caracterización del producto y su potencial aplicación en la industria alimentaria.

1. Diseño experimental

El diseño factorial 2K fue seleccionado por su eficiencia en evaluar múltiples factores con un número relativamente reducido de ensayos experimentales. Esta aproximación fue propuesta por Sir Ronald A. Fisher (1935) y es ampliamente utilizada en investigación de alimentos para estudiar efectos principales e interacciones entre factores (Montgomery, 2020).

En el presente estudio, se consideraron tres factores clave en la formulación del snack:

Tabla 1. Factores para la formulación del snack.

Factor	Descripción	Nivel bajo	Nivel alto
A	Tipo de camarón	Fresco	Comercial
B	Cantidad de fibra	Garbanzo	Trigo
C	Maltodextrina	0 gr	X gr

Matriz experimental

La matriz experimental se presenta en la Tabla 1. Cada fila representa un tratamiento con una combinación específica de los factores definidos:

Tabla 2 Matriz experimental-Arreglo combinatorio (elaboración propia).

Tratamiento	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	a1	b1	c1	a1b1	a1c1	b1c1	a1b1c1
2	a1	b1	c2	a1b1	a1c2	b1c2	a1b1c2
3	a1	b2	c1	a1b2	a1c1	b2c1	a1b2c1
4	a1	b2	c2	a1b2	a1c2	b2c2	a1b2c2
5	a2	b1	c1	a2b1	a2c1	b1c1	a2b1c1
6	a2	b1	c2	a2b1	a2c2	b1c2	a2b1c2
7	a2	b2	c1	a2b2	a2c1	b2c1	a2b2c1
8	a2	b2	c2	a2b2	a2c2	b2c2	a2b2c2

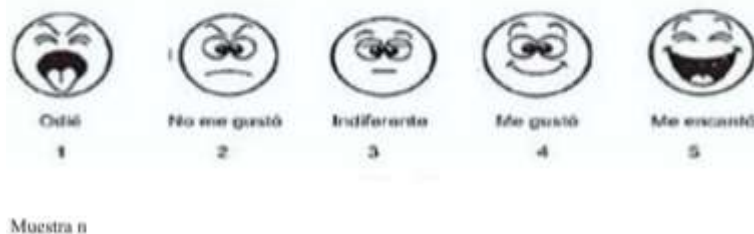
2. Análisis sensorial de aceptación

Los ocho tratamientos obtenidos del diseño factorial se evaluarán mediante un análisis sensorial sencillo, en el que los jueces indicarán únicamente si el producto les gusta o no. Con base en estas preferencias se seleccionarán las dos formulaciones más aceptadas, las cuales, junto con un control, serán sometidas a los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y nutricionales posteriores. La plantilla utilizada para este análisis sensorial se presenta a continuación.

Desarrollo de un subproducto a base de harina de mariscos como alternativa saludable a los alimentos ultra procesados en la industria.

Número de participante: _____

Instrucciones: Prueba las siguientes muestras y marca con una X la carita que más se parezca a la sensación que tuviste al probar el producto.

**Figura 1. Encuesta para análisis sensorial (Cortes, A. 2018)**

Proceso de la elaboración del snack

Materias primas

Para la elaboración del snack se seleccionaron ingredientes que aportaran valor nutricional y funcional al producto final. Los componentes principales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Materias primas empleadas para la elaboración del snack.

Ingrediente	Cantidad
Harina de papa	50 g
Harina de trigo	30 g
Harina de camarón con cabeza	35 g
Maltodextrina	9 g
Aceite de oliva	10 mL
Sal y sazónador de especias	Al gusto
Agua	100 mL

Diagrama del proceso

A continuación, se presenta el diagrama general del proceso de elaboración del snack a base de harina de camarón (figura 2). En él se representan las etapas principales: recepción de materia prima, formulación, mezclado, formado, horneado, enfriado y almacenamiento del producto final.

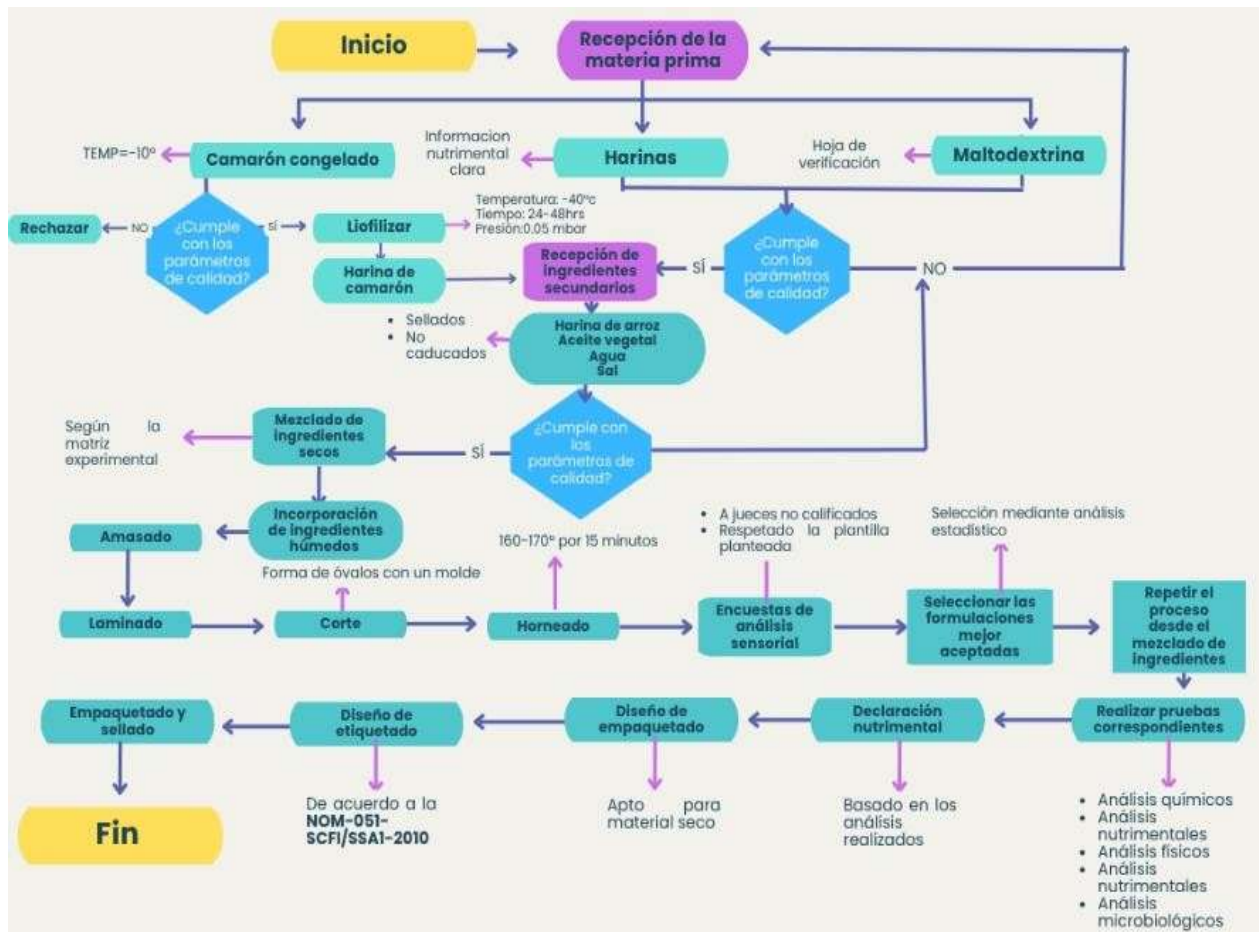


Figura 2. Diagrama general del proceso de elaboración del snack

Resultados y discusión

Aceptación sensorial

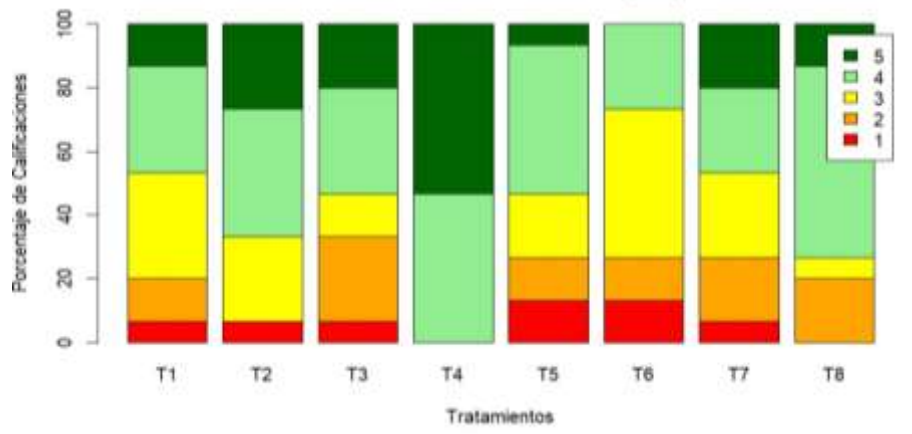


Figura 3. Análisis sensorial de la matriz experimental

La evaluación sensorial, permitió identificar la formulación 4 como la de mayor aceptación por parte de los consumidores, destacando atributos como sabor y textura.

Esta preferencia se atribuye a la combinación de camarón fresco, harina de trigo y 3 g de maltodextrina, que generó una textura ligera y crocante y un sabor equilibrado.

Harina de camarón

Establecimiento del liofilizado en el camarón

Se realizaron 3 pruebas de liofilizado. En la primera, el camarón requirió un tiempo total de 30 horas para completar el proceso. Mientras que en la 2 y 3 se logró una reducción significativa de tiempo de liofilización obteniéndose duraciones totales de 25 y 22 horas, respectivamente.



Figura 4 Muestras del camarón después del proceso de liofilizado

Se observó una relación directa entre las condiciones de liofilización y las propiedades físicas del producto, determinando que un tiempo aproximado de 25 horas y una humedad final cercana al 6 % son los parámetros óptimos para obtener el polvo base de camarón. Mientras que los

tratamientos con humedades elevadas superiores al 21 % (L1A y L2B) derivaron en texturas pastosas e indeseables, y aquellos con deshidratación prolongada o irregular (L1B) afectaron la homogeneidad y el color, las condiciones aplicadas a la muestra L2A (25 h y 6.4 % de humedad) permitieron alcanzar una textura harinosa, homogénea y con la máxima calidad visual y estructural, superando ligeramente a las réplicas de menor tiempo (L3A y L3B).

Chips de camarón

Tabla 4 Resultados de los análisis fisicoquímicos realizados al snack

Prueba realizada	Humedad (%)	Sólidos totales (%)	Cenizas (%)	pH	aw	Proteínas (%)	Grasas totales (%)	Carbohidratos (%)	Azúcares (%)	Color (L, a, b*)
Chips de camarón horneadas	3.12 ± 0.25	96.88 ± 0.25	4.85 ± 0.18	6.72 ± 0.05	0.205 ± 0.012	22.47 ± 0.65	8.95 ± 0.42	58.61 ± 0.90	0	60.41 ± 0.11 / 15.54 ± 0.18 / 35.51 ± 0.26

Los análisis realizados a esta formulación mostraron que el producto presenta una actividad de agua baja, así como características adecuadas de textura y color, lo que indica condiciones favorables para su conservación y calidad.

Estos resultados sugieren que el uso de harina de camarón liofilizado es viable en la elaboración de snacks, manteniendo características sensoriales aceptables y propiedades físicas adecuadas.

Resultados análisis sensorial

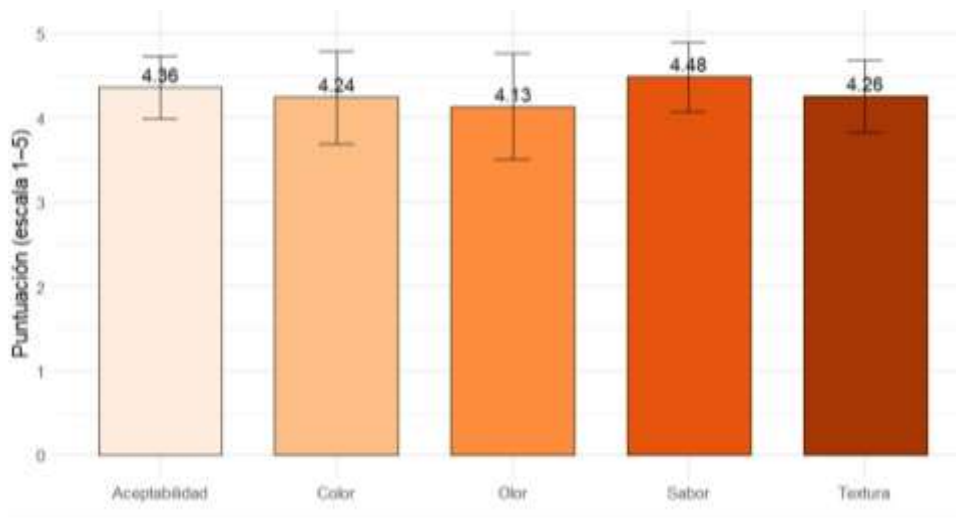


Figura 5. Evaluación sensorial del snack final.

El snack horneado a base de harina de camarón obtuvo una excelente aceptación entre los 40 panelistas no entrenados, situándose en el rango de "me gusta" (4.0 a 4.5) en la escala hedónica de 1 a 5. El sabor (4.48) y la aceptabilidad general (4.36) fueron los atributos mejor calificados. Esta marcada preferencia hacia el sabor es común en consumidores no entrenados al evaluar botanas con un perfil proteico alto (Abebe et al., 2015). Las notas umami y salinas naturales del camarón, potenciadas por los sabores tostados del horneado, incrementaron la palatabilidad, un fenómeno



ampliamente documentado en matrices alimentarias que incorporan subproductos marinos para mejorar el perfil sensorial (Olagunju et al., 2021).

Por otro lado, la textura obtuvo una puntuación de 4.26, demostrando que el proceso de horneado proporcionó una crocancia y firmeza óptimas sin llegar a una dureza excesiva, cumpliendo con las expectativas típicas para snacks de alto valor proteico (Lucas et al., 2018). Finalmente, el color (4.24) y el olor (4.13) recibieron calificaciones ligeramente menores, una tendencia habitual en paneles no entrenados debido a la neofobia o falta de familiaridad con aromas marinos intensos; sin embargo, en este desarrollo, los tonos tostados visuales y el aroma suave fueron bien recibidos y no limitaron la excelente percepción global del producto (Sinthusamran et al., 2019).

Conclusiones

La evaluación sensorial permitió identificar la formulación 4 como la más aceptada por los consumidores. Los análisis realizados a esta formulación mostraron que el producto presenta una actividad de agua baja, así como características adecuadas de textura y color, lo que indica condiciones favorables para su conservación y aceptación.

De acuerdo con la literatura, productos derivados de residuos de camarón presentan propiedades funcionales y nutricionales que respaldan su uso en alimentos, especialmente por su contenido de proteína

Referencias

- Abebe, W., Ronda, F., Granito, M., & Collar, C. (2015). Bean in-dough structuring formulation: sensory properties and consumer acceptability of high-protein snacks. *Journal of Food Science and Technology*, 52(11), 7436-7443.
- Eke-Ejiofor, J., & Allen, J. E. (2021). Microbiological, physicochemical and sensory properties of biscuits produced from wheat, cassava and fish flour blends. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 6(1), 54-61.
- Heinritz, M. L., Ruble, R. D., Wagner, D. E., & Tatini, S. R. (2000). Incidence of Salmonella in fish and seafood. *Journal of Food Protection*, 63(5), 579-592.
- Jiamyangyuen, S., Nuengchamnong, N., & Binbahrudin, R. (2019). Physicochemical and sensory properties of healthy rice snack enriched with fish powder. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(12), 3210-3218.
- Lucas, B. F., de Moraes, M. G., Santos, T. D., & Costa, J. A. V. (2018). Spirulina for snack enrichment: Nutritional, physical and sensory characteristics. *LWT - Food Science and Technology*, 90, 224-231.
- Olagunju, A. I., Omoba, O. S., Enujiugha, V. N., & Alashi, A. M. (2021). Development and evaluation of nutrient-dense extruded snacks from fish wastes and underutilized legumes. *Food Science & Nutrition*, 9(1), 312-323.



- Rhee, K. S., Cho, S. H., & Pradhan, A. M. (2004). Composition, color and texture of extruded corn snacks containing squid meat. *Journal of Food Science*, 69(5), FMS215-FMS219.
- Shaviklo, G. R., Thorkelsson, G., Arason, S., & Rafipour, F. (2011). Quality characteristics of fish crackers developed from washed mince of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*). *Journal of Food Science and Technology*, 48(6), 741-747.
- Sinthusamran, S., Benjakul, S., & Hemar, Y. (2019). Physical and sensory properties of fish skin snacks as affected by frying and baking processes. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 2131-2141.
- Tomás-Cobos, L., Martínez, A., Rodrigo, D., & Martínez, M. (2018). Design of safe procedures for the manufacturing of high-protein snacks based on fish and seafood co-products. *Food Control*, 85, 342-350.