



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS**

FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

ÁREA: BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA

T E S I S

**“CARACTERIZACIÓN Y DESARROLLO DE TORTILLAS DE
MAÍCES CRIOLLOS ADICIONADAS CON HARINA DE HOJAS DE
MORINGA OLEIFERA: EVALUACIÓN FUNCIONAL”**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

P R E S E N T A:

Q.F.B. NOE CALDERÓN TÉLLEZ

ASESORES DE TESIS:

D.C. HÉCTOR EDUARDO MARTÍNEZ FLORES

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO, FEBRERO DEL 2026.

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

El presente documento es producto del trabajo d investigación de Noe Calderon Téllez, estudiante del Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas y respetando siempre los más altos estándares éticos solicitados por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Todos los datos de la investigación reportada en el presente documento de tesis (excepto los indicados explícitamente en el texto) fueron obtenidos por Noe Calderón Téllez durante el periodo que fue estudiante de la Maestría en Ciencias Biológicas bajo la Dirección del Dr. Héctor Eduardo Martínez Flores.

Morelia, Mich., a 24 de Febrero de 2026

Q.F.B. Noe Calderon Téllez



Dr. Héctor Eduardo Martínez Flores



Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas, UMSNH

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, al Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas, a la Facultad de Químico Farmacobiología y al Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimentos, por haberme dado la oportunidad de cursar mis estudios desde nivel medio superior hasta posgrado y ser un pilar importante en mi formación personal y académica.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por la beca que me otorgó durante los estudios de maestría la cual me permitió financiar mi posgrado.

A mi director de Tesis, el Dr. Héctor E. Martínez Flores, a quien admiro y respeto mucho como investigador, le agradezco haberme dado la oportunidad y confianza para realizar este proyecto, por su apoyo incondicional y por su valiosa dirección para llegar a la conclusión de esta tesis.

A los integrantes de mi comité sinodal, la Dra. Eunice Tranquilino Rodríguez, el Dr. José Juan Virgen Ortiz, al Dr. Rafael Zamora Vega y a la Dra. Rosa Elena Pérez Sánchez, por sus valiosas aportaciones para mejorar este trabajo, y por su contribución en mi formación como académica, les agradezco mucho su tiempo y su experiencia.

A mis amigos y/o colegas del laboratorio que me apoyaron y acompañaron durante esta etapa de mi vida, haciendo mis días en el laboratorio más divertidos, amenos y productivos con sus consejos, pláticas y bromas. De forma particular a mi compañera Jimena y mi compañera Gabriela por darme los mejores momentos en el laboratorio, los llevaré siempre conmigo. Además agradezco al técnico de laboratorio Miguel Ángel por su valioso apoyo y supervisión durante mi experimentación en el laboratorio.

DEDICATORIA

A mis padres, Marisol Téllez Esquivel y Noé Calderón Zambrano por ser mi mayor ejemplo y sustento en la vida con todo su amor, su cariño y sus consejos. A mis hermanas, Tania Calderón Téllez y Daniela Calderon Téllez por acompañarme durante todas mis etapas y jamás soltarme. Jamás me alcanzará la vida para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi grupo de amigos “*e. coli*” por tantos momentos, risas y experiencias vividas en la última década de mi vida. Por tantas noches de juego, reuniones y viajes juntos que hacen más amena la vida. Por amigos como ustedes es que vale la pena vivirla.

A Mariana por ser mi compañera de vida durante esta etapa de mi vida, por ser mi lugar seguro durante los últimos años de mi vida y demostrarme día con día que no es difícil amarme como yo creía.

A mi primo René Calderón Gaona por ser el hermano que nunca tuve y estar ahí siempre que lo he necesitado. Él es mi mayor ejemplo de lo que es una persona incondicional.

A todos mis amigos cercanos Gabriela, Uriel, Diana, Ana, Eli, Airy, Dalia, Dafne, Liz, Armando, Arturo, Jaqueline por siempre brindarme un espacio dónde sentirme libre, cómodo y valorado.

A mis 36 modelos biológicos que formaron parte de mi experimentación cuya vida sirvió para concluir satisfactoriamente mi investigación.

“Mantente por tanto sencillo, bueno, puro, respetable, sin arrogancia, amigo de lo justo, piadoso, benévolo, firme en el cumplimiento del deber, lucha por conservarte tal cual la filosofía ha querido hacerte.”

-Meditaciones de Marco Aurelio, libro VI fragmento 30.

Índice general

Índice de tablas

Índice de figuras

Capítulo 1: Introducción general	3
1.1 Introducción	3
1.1.1 El maíz: generalidades y relevancia a nivel global.....	3
1.1.2 Importancia del maíz en México	3
1.1.3 Maíces pigmentados: compuestos bioactivos y función antioxidante.....	5
1.1.4 Limitaciones nutricionales del maíz	6
1.1.5 Nixtamalización: efectos tecnológicos y nutrimentales	7
1.1.6 Tortilla como vehículo de fortificación nutricional.....	8
1.1.7 Antecedentes de tortillas fortificadas: avances y limitaciones	9
1.1.8 <i>Moringa oleifera</i> : composición, usos y potencial funcional	10
1.1.9 Compuestos bioactivos de las hojas de <i>Moringa oleifera</i>	11
1.1.10 Concentrado proteico de <i>Moringa oleifera</i>	12
1.2 Justificación	13
1.3 Hipótesis	13
1.4 Objetivo general.....	13
1.4.1 Objetivos específicos.....	14
1.5 Estrategia experimental.....	14
1.6 Literatura citada	16
Capítulo II: Caracterización de maíces criollos y harinas nixtamalizadas	20
2.1 Resumen.....	20
2.2 Introducción	20
2.3 Materiales y métodos	21
2.3.1 Origen y colecta de los maíces	21
2.3.2 Propiedades físicas y fisicoquímicas de los granos de maíz	22
2.3.3 Preparación de harinas nixtamalizadas.....	22
2.3.4 Caracterización bromatológica de las harinas y granos de maíz	23
2.3.5 Caracterización fisicoquímica de las harinas.....	24
2.3.6 Obtención de extractos para la evaluación de la capacidad antioxidante	24
2.3.7 Determinación de compuestos fenólicos y flavonoides totales	24

2.3.8	Evaluación de la capacidad antioxidante.....	24
2.3.9	Determinación del perfil de aminoácidos.....	25
2.3.10	Análisis estadístico	25
2.4	Resultados y discusión.....	25
2.4.1	Caracterización física del grano de maíz.....	25
2.4.2	Caracterización fisicoquímica de los granos de maíz.....	27
2.4.3	Análisis bromatológico de los granos de maíz	28
2.4.4	Harinas nixtamalizadas de maíz	30
2.4.5	Caracterización fisicoquímica de las harinas nixtamalizadas de maíz	30
2.4.6	Análisis bromatológico de las harinas nixtamalizadas de maíz	32
2.4.7	Perfil de aminoácidos de los granos de maíz y harinas nixtamalizadas	33
2.4.8	Análisis polifenólico y capacidad antioxidante en granos de maíz y harinas nixtamalizadas.....	36
2.5	Conclusiones capítulo II	39
2.6	Literatura citada	39
Capítulo III: Desarrollo y caracterización de tortillas funcionales con <i>Moringa oleifera</i>		43
3.1	Resumen.....	43
3.2	Introducción	43
3.3	Materiales y métodos	44
3.3.1	Materiales	44
3.3.2	Obtención del concentrado proteico de hoja de <i>Moringa oleifera</i> (CPMO) ..	45
3.3.3	Formulación y elaboración de tortillas	45
3.3.4	Obtención de extractos para la evaluación de la capacidad antioxidante.....	46
3.3.5	Análisis bromatológico de las tortillas, HMO y CPMO.....	46
3.3.6	Determinación de compuestos fenólicos y flavonoides totales	46
3.3.7	Evaluación de la capacidad antioxidante.....	47
3.3.8	Evaluación de calidad tecnológica de las tortillas	47
3.3.9	Análisis estadístico	47
3.4	Resultados y discusión.....	48
3.4.1	Caracterización bromatológica de la harina y concentrado proteico de la hoja de <i>M. oleifera</i>	48
3.4.2	Perfil de aminoácidos de la harina y concentrado proteico de la hoja de <i>M. oleifera</i> 50	

3.4.3	Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de la harina y concentrado proteico hoja de <i>Moringa oleifera</i>	51
3.4.4	Composición bromatológica de tortillas de maíz y tortillas fortificadas con moringa	53
3.4.5	Perfil de aminoácidos de las tortillas de maíz y tortillas adicionadas con moringa	55
3.4.6	Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de tortillas de maíz y tortillas de maíz fortificadas con moringa.....	57
3.4.7	Propiedades reológicas de las tortillas.....	60
3.5	Conclusiones capítulo III	62
3.6	Literatura citada	63
Capítulo IV: Evaluación biológica en modelos de crecimiento y dieta hiperlipidica		67
4.1	Resumen.....	67
4.2	Introducción	67
4.3	Materiales y métodos	70
4.3.1	Consideraciones éticas y animales experimentales	70
4.3.2	Diseño experimental y formulación de dietas para la evaluación de la calidad proteica	70
4.3.2.1	Periodo experimental y monitoreo	73
4.3.2.2	Determinación de la relación de eficiencia proteica (PER).....	73
4.3.2.3	Determinación de la digestibilidad aparente de la proteína.....	73
4.3.3	Diseño experimental para la evaluación de los efectos hipolipemiantes e hipoglucemiantes.....	73
4.3.3.1	Periodo experimental y monitoreo	76
4.3.3.2	Análisis realizados para determinar el efecto metabólico	76
4.3.4	Análisis estadístico	77
4.4	Resultados y discusión.....	77
4.4.1	Evaluación biológica de la calidad proteica de las tortillas experimentales...	77
4.4.2	Evaluación de efecto hipolipemiante e hipoglucemiante	79
4.5	Conclusiones capitulo IV	84
4.6	Literatura citada	85
5	Discusión general	88
6	Conclusiones generales	90

Índice de tablas

Tabla 1.	Caracterización física de los granos de maíz.	26
Tabla 2.	Propiedades fisicoquímicas de los granos de maíz	28
Tabla 3.	Caracterización bromatológica de los granos de maíz.	29
Tabla 4.	Propiedades fisicoquímicas de las harinas nixtamalizadas de maíces criollos. .	31
Tabla 5.	Análisis bromatológico de harinas nixtamalizadas de maíz.....	32
Tabla 6.	Perfil de aminoácidos de maíces criollos azul, blanco y rojo	34
Tabla 7.	Perfil de aminoácidos de harinas nixtamalizadas de maíces azul, blanco y rojo. 35	
Tabla 8.	Determinación de ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante en granos de maíz.	37
Tabla 9.	Determinación de ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante en harinas nixtamalizadas de maíz (HMN).....	38
Tabla 10.	Análisis bromatológico de la harina de hoja de <i>M. oleifera</i> (HMO) y concentrado proteico de <i>M. oleifera</i> (CPMO).....	49
Tabla 11.	Perfil de aminoácidos de HMO y CMPO.....	51
Tabla 12.	Determinación de ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante en HMO y CMPO	52
Tabla 13.	Análisis bromatológico de tortillas de maíz, tortillas adicionadas con harina y concentrado proteico de <i>M. oleifera</i>	54
Tabla 14.	Perfil de aminoácidos de tortillas de maíz, tortillas de maíz con harina y concentrado de la hoja de <i>M. oleifera</i>	56
Tabla 15.	Determinación de ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante en tortillas de maíz, tortillas de maíz con harina y concentrado de la hoja de <i>M. oleifera</i> . 59	
Tabla 16.	Reología de las tortillas de maíz	62
Tabla 17.	Análisis de la composición nutricional de las tortillas desarrolladas.....	72
Tabla 18.	Ingredientes para la formulación de las diferentes dietas.	72
Tabla 19.	Análisis de la composición nutricional de las tortillas desarrolladas.....	74
Tabla 20.	Ingredientes para la formulación de las diferentes dietas	75
Tabla 21.	Bromatológico teórico final de las dietas en experimentación	76
Tabla 22.	Resultados de estudio en modelo biológico del PER y digestibilidad	79
Tabla 23.	Ganancia de peso y alimento consumido de los animales en experimentación. 80	

Tabla 24.	Parámetros sanguíneos de los animales en experimentación	82
Tabla 25.	Parámetros de peso, humedad y lípidos en hígado.....	84

Índice de figuras

Figura 1.	Variedades de maíz criollo pigmentado y no pigmentado	6
Figura 2.	Hojas de <i>Moringa oleifera</i> secas.....	11
Figura 3.	Arantepacua, zona de cultivo. 19.59354° N, 101.968764° O	22
Figura 4.	Nixtamalización del maíz.....	23
Figura 5.	Proceso de molienda, secado y pulverización del nixtamal.	23
Figura 6.	Maíces criollos pigmentados y no pigmentados.....	26
Figura 7.	Harinas nixtamalizadas de maíz	30
Figura 8.	Concentrado proteico de <i>M. oleifera</i>	45
Figura 9.	Prueba de pérdida de peso tras la cocción , grado de inflado y rolabilidad de tortilla. .	61
Figura 10.	Prueba de tensión en tortilla	61
Figura 11.	Rack de los modelos biológicos durante el experimento	71

Resumen

El maíz constituye el alimento base de la dieta mexicana; sin embargo, su proteína presenta limitaciones nutricionales asociadas a deficiencias en aminoácidos esenciales como lisina y triptófano, lo que compromete su calidad biológica cuando se consume como fuente exclusiva. En este contexto, la incorporación de ingredientes vegetales con alto valor proteico y contenido de compuestos bioactivos representa una estrategia viable para mejorar el perfil nutricional de productos tradicionales. El objetivo de la presente investigación fue desarrollar y evaluar tortillas elaboradas a partir de maíces criollos de la región Purépecha de Michoacán, adicionadas con harina y concentrado proteico de hojas de *Moringa oleifera*, determinando sus propiedades fisicoquímicas, nutrimentales, funcionales y su impacto biológico en modelos experimentales. En una primera etapa se caracterizaron maíces criollos azul, blanco y rojo y sus harinas nixtamalizadas mediante análisis físico, composición proximal, perfil de aminoácidos y capacidad antioxidante (ABTS^{•+} y DPPH[•]). Posteriormente se obtuvo harina y concentrado proteico de *M. oleifera* y se determinaron su composición proximal y perfil aminoacídico. Con base en estos resultados, se formularon tortillas control y tortillas fortificadas, las cuales fueron evaluadas en términos de composición nutrimental, contenido de compuestos fenólicos y propiedades tecnológicas.

La adición de moringa incrementó significativamente el contenido de proteína (hasta 12.55 %), fibra dietética y aminoácidos esenciales, particularmente lisina y triptófano, mejorando el perfil aminoacídico en comparación con las tortillas control. Asimismo, las formulaciones enriquecidas mostraron mayor capacidad antioxidante y contenido fenólico. En modelos biológicos con ratas Wistar, las tortillas fortificadas presentaron mayor eficiencia proteica y digestibilidad aparente respecto a las tortillas elaboradas únicamente con maíz. En una segunda etapa experimental, en un modelo de dieta hiperlipídica, las tortillas con moringa contribuyeron a reducir triglicéridos séricos y acumulación hepática de lípidos en comparación con la dieta hiperlipídica control. Los resultados demuestran que la incorporación de *Moringa oleifera*, particularmente en forma de concentrado proteico, permite mejorar la calidad proteica y el perfil funcional de tortillas elaboradas con maíces criollos, sin afectar de manera desfavorable sus propiedades tecnológicas, posicionándolas como una alternativa con potencial nutricional mejorado dentro de la dieta tradicional.

Palabras clave: maíz criollo, *Moringa oleifera*, calidad proteica, aminoácidos esenciales, tortilla funcional, capacidad antioxidante.

Abstract

Maize is a staple food in the Mexican diet; however, its protein fraction presents nutritional limitations due to deficiencies in essential amino acids such as lysine and tryptophan, which compromise its biological quality when consumed as the sole protein source. The incorporation of plant-based ingredients with high protein value and bioactive compounds represents a feasible strategy to enhance the nutritional profile of traditional products. The objective of this study was to develop and evaluate tortillas produced from native maize varieties from the Purépecha region of Michoacán, Mexico, fortified with leaf flour and protein concentrate from *Moringa oleifera*, assessing their physicochemical, nutritional, functional, and biological properties. In the first stage, blue, white, and red native maize grains and their nixtamalized flours were characterized in terms of physical properties, proximate composition, amino acid profile, and antioxidant capacity (ABTS•⁺ and DPPH• assays). *Moringa* leaf flour and protein concentrate were subsequently obtained and characterized. Based on these results, control and fortified tortillas were formulated and evaluated for nutritional composition, phenolic content, antioxidant capacity, and technological properties.

Fortification with *moringa* significantly increased protein content (up to 12.55%), dietary fiber, and essential amino acids, particularly lysine and tryptophan, improving the amino acid balance compared to control tortillas. Enriched formulations also exhibited higher antioxidant capacity and phenolic content. In Wistar rat growth models, fortified tortillas showed improved protein efficiency ratio and apparent digestibility compared to maize-only tortillas. In a second experimental stage using a high-fat diet model, *moringa*-fortified tortillas contributed to lower serum triglycerides and reduced hepatic lipid accumulation compared to the hyperlipidic control diet. Overall, the incorporation of *Moringa oleifera*, especially as a protein concentrate, enhances the protein quality and functional profile of tortillas made from native maize without adversely affecting their technological characteristics, supporting their potential as nutritionally improved traditional foods.

Keywords: native maize, *Moringa oleifera*, protein quality, essential amino acids, functional tortilla, antioxidant capacity.

Capítulo 1: Introducción general

1.1 Introducción

1.1.1 El maíz: generalidades y relevancia a nivel global

El maíz (*Zea mays L.*) es uno de los cultivos cerealícolas más importantes a nivel mundial, tanto por su volumen de producción como por su versatilidad de uso en sistemas alimentarios, industriales y pecuarios. Junto con el trigo y el arroz, constituye la base energética de una parte significativa de la población humana, siendo consumido de forma directa o indirecta en múltiples regiones del planeta (FAO, 2022). Su elevada productividad, amplia adaptabilidad agroecológica y diversidad genética han permitido su expansión desde su centro de origen hacia prácticamente todos los continentes, donde se cultiva bajo condiciones climáticas y edáficas contrastantes. Desde el punto de vista agronómico, el maíz destaca por su eficiencia fotosintética de tipo C4, lo que le confiere una alta capacidad de fijación de carbono y un rendimiento superior en ambientes con alta radiación solar y temperaturas elevadas (Leakey et al., 2006). Esta característica ha favorecido su incorporación en sistemas agrícolas tanto tradicionales como intensivos, posicionándolo como un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria global. En términos de producción, el maíz supera a otros cereales en toneladas cosechadas anualmente, destinándose no solo al consumo humano, sino también a la alimentación animal y a la obtención de productos industriales como almidones, aceites, edulcorantes y biocombustibles (Shiferaw et al., 2011).

En el ámbito nutricional, el grano de maíz representa una fuente importante de carbohidratos complejos y aporta cantidades variables de proteína, lípidos, fibra dietaria y micronutrientes, cuya composición depende de factores genéticos, ambientales y de manejo poscosecha (Serna-Saldívar, 2015). No obstante, se reconoce que la proteína del maíz presenta limitaciones en aminoácidos esenciales como la lisina y el triptófano, lo que ha motivado históricamente el desarrollo de estrategias de mejoramiento genético, procesamiento y complementación alimentaria para optimizar su calidad nutricional (Bressani, 2008; Prasanna et al., 2001). Además de su valor alimentario, el maíz constituye un modelo biológico de gran relevancia científica. Su genoma fue uno de los primeros entre los cultivos básicos en ser secuenciado, lo que ha permitido avances significativos en genética, biotecnología y fisiología vegetal (Schnable et al., 2009). Paralelamente, la diversidad morfológica, bioquímica y funcional de sus variedades ha despertado un creciente interés en el estudio de compuestos bioactivos, particularmente en maíces pigmentados, por su potencial antioxidante y su posible contribución a la prevención de enfermedades crónicas asociadas al estrés oxidativo (Žilić et al., 2012; Salinas-Moreno et al., 2019).

1.1.2 Importancia del maíz en México

El maíz (*Zea mays L.*) constituye uno de los pilares fundamentales de la historia, la cultura y la alimentación en México. Este cereal, originario de Mesoamérica, fue domesticado hace

aproximadamente 9,000 años a partir de poblaciones silvestres de teocintle, mediante un proceso continuo de selección y manejo realizado por los pueblos originarios (Matsuoka et al., 2002; Piperno et al., 2009). Desde entonces, el maíz ha trascendido su función como cultivo alimentario para consolidarse como un elemento central en la identidad biocultural del país. En el contexto mexicano, el maíz no solo representa una fuente primaria de energía y nutrientes para la población, sino que también se encuentra profundamente arraigado en la cosmovisión de numerosas culturas indígenas. Textos fundacionales como el Popol Vuh describen al ser humano como creado a partir de masa de maíz, lo que evidencia la dimensión simbólica y espiritual de este cultivo en las civilizaciones mesoamericanas (Staller et al., 2010). Esta relevancia cultural se ha mantenido vigente a lo largo del tiempo y se manifiesta en prácticas agrícolas tradicionales, rituales comunitarios, sistemas alimentarios locales y expresiones culinarias que continúan siendo parte de la vida cotidiana en amplias regiones del país.

Desde una perspectiva socioeconómica y alimentaria, el maíz es el principal componente de la dieta mexicana, especialmente en zonas rurales, donde el consumo diario de productos derivados como la tortilla constituye la base de la ingesta calórica (Gwirtz & García-Casal, 2014). La tortilla elaborada a partir de maíz nixtamalizado es un alimento emblemático que aporta carbohidratos complejos, fibra dietaria, minerales y una fracción relevante de proteína vegetal, desempeñando un papel esencial en la seguridad alimentaria nacional (Bressani, 2008). La importancia del maíz en México se refleja también en su producción, ya que el país se reconoce como centro de origen y diversificación de esta especie, albergando una notable riqueza genética que ha sido conservada principalmente por agricultores campesinos e indígenas (CONABIO, 2012). Adicionalmente, el cultivo de maíz en México está estrechamente vinculado a sistemas agrícolas tradicionales como la milpa, un agroecosistema policultural que integra especies como frijol, calabaza y chile, promoviendo interacciones ecológicas favorables, el aprovechamiento eficiente de recursos y la diversificación de la dieta (Altieri, 2009). Este sistema no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que refuerza la autosuficiencia alimentaria y la resiliencia de las comunidades frente a fenómenos climáticos, económicos y sociales adversos.

En regiones como Michoacán, particularmente en la Meseta Purépecha, el maíz adquiere un significado adicional como símbolo de resistencia cultural y territorial. A pesar de la presión ejercida por la agricultura industrial, la urbanización y los cambios en las dinámicas de mercado, las comunidades locales han logrado preservar prácticas ancestrales de cultivo y el uso de variedades criollas adaptadas a condiciones agroecológicas específicas (Pérez-Terrazas et al., 2019). Estas prácticas no solo garantizan la continuidad del maíz como alimento básico, sino que también representan una forma activa de conservación del patrimonio genético y cultural. En este sentido, el maíz en México debe entenderse como un recurso estratégico que articula dimensiones biológicas, nutricionales, culturales y económicas. Su importancia trasciende el ámbito agrícola para posicionarse como un elemento clave en el desarrollo rural, la soberanía alimentaria y la preservación de la diversidad biocultural del país, aspectos que justifican el creciente interés científico por su estudio y aprovechamiento integral

1.1.3 Maíces pigmentados: compuestos bioactivos y función antioxidante

Dentro de la diversidad de maíces criollos mexicanos, los maíces pigmentados — principalmente de grano azul, morado, rojo y negro— han despertado un interés creciente debido a su elevada concentración de compuestos bioactivos con potencial funcional. La coloración característica de estos granos se debe principalmente a la acumulación de metabolitos secundarios, cuya naturaleza química y concentración dependen del genotipo, el ambiente de cultivo y las prácticas poscosecha (López-Martínez et al., 2009; Mora-Rochín et al., 2010).

Los compuestos bioactivos predominantes en los maíces pigmentados pertenecen al grupo de los polifenoles, entre los que destacan las antocianinas, los flavonoides no antociánicos y los ácidos fenólicos. Las antocianinas son responsables de las tonalidades azuladas, moradas y rojizas del grano y se localizan principalmente en el pericarpio y la capa de aleurona. En maíces azules y morados, los derivados de cianidina, pelargonidina y peonidina son los más comúnmente reportados, generalmente en forma de glucósidos acilados, los cuales confieren mayor estabilidad frente a factores ambientales (Salinas-Moreno et al., 2012; López-Martínez et al., 2011). Además de las antocianinas, los maíces pigmentados contienen cantidades relevantes de flavonoides como quercetina, luteolina y kaempferol, así como ácidos fenólicos libres y conjugados, entre los que destacan el ácido ferúlico, p-cumárico y sinápico. Estos compuestos se encuentran tanto en la fracción soluble como en la fracción ligada a la pared celular, lo que influye en su biodisponibilidad y comportamiento durante el procesamiento (Serna-Saldívar, 2010). En conjunto, esta matriz polifenólica compleja distingue a los maíces pigmentados de los maíces blancos o amarillos convencionales, que presentan concentraciones significativamente menores de estos metabolitos (Mora-Rochín et al., 2010).

La relevancia nutracéutica de los maíces pigmentados radica principalmente en su capacidad antioxidante, entendida como la habilidad de neutralizar especies reactivas de oxígeno y nitrógeno que participan en procesos de estrés oxidativo. Diversos estudios han demostrado una correlación positiva entre el contenido de compuestos fenólicos totales y la actividad antioxidante medida mediante ensayos químicos como ABTS y DPPH, tanto en grano crudo como en productos procesados derivados del maíz pigmentado (López-Martínez et al., 2009; Mora-Rochín et al., 2010). Esta actividad antioxidante se atribuye a la estructura química de los polifenoles, particularmente a la presencia de grupos hidroxilo capaces de donar electrones o átomos de hidrógeno para estabilizar radicales libres (Liu, 2013).

Desde un punto de vista fisiológico, la ingesta de alimentos ricos en compuestos fenólicos se ha asociado con efectos benéficos en la salud, incluyendo la modulación de procesos inflamatorios, la mejora del metabolismo de la glucosa y los lípidos, y la reducción del riesgo de enfermedades crónicas no transmisibles. Aunque gran parte de la evidencia proviene de estudios *in vitro* y modelos animales, los resultados sugieren que los maíces pigmentados pueden contribuir de manera significativa a la calidad antioxidante de la dieta cuando se consumen de forma regular, especialmente en poblaciones donde el maíz constituye un alimento básico (Liu, 2013; de la Parra et al., 2007).



Maíz azul

Maíz blanco

Maíz rojo

Figura 1. Variedades de maíz criollo pigmentado y no pigmentado

No obstante, el contenido y la funcionalidad de estos compuestos bioactivos no son estáticos y pueden verse afectados por los procesos tecnológicos a los que se somete el grano. En particular, tratamientos térmicos y alcalinos, como la nixtamalización, pueden inducir pérdidas parciales, transformaciones estructurales o liberación de compuestos fenólicos ligados, modificando tanto su concentración como su actividad antioxidante (López-Martínez et al., 2011). Por ello, resulta fundamental evaluar de manera integral el impacto del procesamiento tradicional del maíz sobre la estabilidad y funcionalidad de los compuestos bioactivos presentes en los maíces pigmentados. Los maíces pigmentados representan una materia prima de alto interés para el desarrollo de alimentos funcionales, al combinar su relevancia cultural con un perfil bioactivo distintivo. La caracterización detallada de sus compuestos antioxidantes y el estudio de su comportamiento durante procesos tradicionales y modernos permiten establecer bases científicas sólidas para su aprovechamiento tecnológico, sentando las bases para estrategias de fortificación y formulación que se abordan en los apartados subsecuentes.

1.1.4 Limitaciones nutricionales del maíz

A pesar de su importancia como alimento básico, el maíz presenta limitaciones nutricionales bien documentadas, particularmente en lo que respecta a la calidad de su fracción proteica. El contenido proteico del grano de maíz oscila generalmente entre 7 y 11 %, dependiendo del genotipo y las condiciones de cultivo; sin embargo, más allá de la cantidad total de proteína, su principal restricción radica en un perfil aminoacídico desequilibrado, caracterizado por una baja proporción de aminoácidos esenciales, especialmente lisina y triptófano (Bressani, 2008; Serna-Saldívar, 2010). Esta deficiencia compromete el valor biológico de la proteína del maíz y limita su capacidad para cubrir adecuadamente los requerimientos nutricionales humanos cuando se consume como fuente proteica principal. Desde el punto de vista bioquímico, esta limitación se explica por la composición de las proteínas de reserva del endospermo, dominadas por las zeínas, un grupo de prolaminas ricas en aminoácidos hidrofóbicos pero pobres en lisina y triptófano. Las

zeínas representan hasta el 60 % del total de proteínas del grano y presentan una baja digestibilidad, lo que reduce aún más el aprovechamiento proteico del maíz (Paes, 2006). En contraste, las fracciones proteicas no zeínicas —como las glutelinas y albúminas— contienen un perfil aminoacídico más balanceado, pero se encuentran en menor proporción. Esta distribución estructural explica por qué el maíz, aun con variaciones entre razas y variedades criollas, mantiene una limitación intrínseca en términos de calidad proteica.

En poblaciones con alta dependencia del maíz como alimento básico, esta deficiencia aminoacídica ha sido históricamente compensada mediante prácticas dietéticas tradicionales, como la combinación del maíz con leguminosas, particularmente frijol, cuya proteína es rica en lisina y complementa el perfil aminoacídico del cereal (Bressani, 2008). No obstante, los cambios en los patrones de consumo, la reducción de la diversidad dietaria y el incremento en la ingesta de alimentos ultraprocesados han disminuido la frecuencia de estas combinaciones tradicionales, exacerbando el riesgo de deficiencias proteicas, especialmente en grupos vulnerables como niños y adultos mayores (Hernández-Uribe et al., 2020). Estas limitaciones han motivado el desarrollo de estrategias orientadas a mejorar la calidad proteica del maíz y de sus productos derivados. Entre ellas se incluyen la selección genética, el uso de maíces con mayor proporción de proteínas no zeínicas, el procesamiento tradicional mediante nixtamalización —que puede inducir cambios parciales en la solubilidad y digestibilidad proteica— y la fortificación con fuentes proteicas externas de origen vegetal con perfiles aminoacídicos complementarios (Serna-Saldívar, 2010; Gwirtz & García-Casal, 2014).

1.1.5 Nixtamalización: efectos tecnológicos y nutrimentales

La nixtamalización es un proceso tradicional de cocción alcalina indispensable para la elaboración de tortillas y otros alimentos derivados del maíz, y constituye una de las tecnologías alimentarias más relevantes desarrolladas en Mesoamérica. Este tratamiento consiste en la cocción del grano en una solución alcalina, generalmente hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, seguida de un periodo de reposo, lavado y molienda para la obtención de masa. Durante este proceso, el pH elevado y la acción térmica inducen modificaciones profundas en la estructura del grano, particularmente en el pericarpio, el endospermo y la matriz proteica-amilácea, lo que impacta de manera directa en las propiedades tecnológicas y nutricionales del producto final (Serna-Saldívar, 2010; Santiago-Ramos et al., 2018).

A nivel estructural, la nixtamalización provoca la solubilización parcial de las hemicelulosas del pericarpio, facilitando su desprendimiento y permitiendo una mayor hidratación del endospermo. Este fenómeno se acompaña de la gelatinización parcial del almidón y de cambios en la organización de las proteínas de reserva, lo que favorece la cohesividad y plasticidad de la masa. La capa de aleurona, rica en proteínas, lípidos y vitaminas del complejo B, permanece mayormente adherida al endospermo, contribuyendo a minimizar las pérdidas de nutrientes durante el proceso de cocción y lavado (Santiago-Ramos et al., 2018; Bressani, 2008). Estos cambios estructurales son determinantes para las características de inflado, textura y rolabilidad de la tortilla. Uno de los efectos más relevantes de la nixtamalización es el incremento significativo en el contenido de calcio del maíz, derivado de la difusión de iones Ca^{2+} desde la solución alcalina hacia la matriz del

grano. Este calcio se asocia principalmente con componentes de la pared celular y con el almidón, incrementando su biodisponibilidad en comparación con otras fuentes dietarias de este mineral (Rosado et al., 2005; Serna-Saldívar, 2010). Asimismo, la nixtamalización favorece la liberación de niacina previamente ligada, previniendo deficiencias nutricionales como la pelagra, históricamente asociada al consumo exclusivo de maíz no tratado (Bressani, 2008).

En relación con la fracción proteica, el tratamiento alcalino induce modificaciones en la solubilidad y digestibilidad de las proteínas del maíz. Si bien la composición aminoacídica no se altera de manera sustancial, la nixtamalización puede mejorar parcialmente la digestibilidad proteica al desnaturalizar las zeínas y facilitar el acceso de enzimas digestivas, especialmente cuando el proceso se combina con molienda adecuada y cocción posterior en forma de tortilla (Serna-Saldívar, 2010; Gwirtz & García-Casal, 2014). De forma paralela, se ha observado un aumento en la fracción de fibra dietaria insoluble debido a la reorganización de polisacáridos estructurales, lo que puede tener implicaciones positivas en la salud gastrointestinal.

La nixtamalización también impacta el contenido y la disponibilidad de compuestos bioactivos, particularmente los compuestos fenólicos. El ambiente alcalino favorece la liberación de ácidos fenólicos ligados a la pared celular, como el ácido ferúlico, incrementando la fracción soluble y, en algunos casos, la actividad antioxidante del producto final. Sin embargo, este efecto depende del tipo de maíz, especialmente en variedades pigmentadas, donde pueden coexistir pérdidas parciales de antocianinas termolábiles y transformaciones estructurales que modifican su estabilidad y funcionalidad (de la Parra et al., 2007; López-Martínez et al., 2011). La nixtamalización no solo constituye un proceso tecnológico esencial para la elaboración de tortillas, sino también un factor determinante en la calidad nutrimental del maíz y sus derivados. Las transformaciones inducidas en la estructura del grano, la biodisponibilidad mineral, la digestibilidad proteica y la liberación de compuestos bioactivos establecen una base científica sólida para explorar estrategias de mejora nutricional mediante la formulación de productos fortificados, como se aborda en los apartados posteriores.

1.1.6 Tortilla como vehículo de fortificación nutricional

La tortilla de maíz es uno de los alimentos más consumidos en México y en diversas regiones de América Latina, y constituye una fuente primaria de energía, carbohidratos complejos, fibra dietaria y calcio, particularmente en poblaciones rurales y de bajos ingresos (de la Parra et al., 2007; Palacios-Fonseca et al., 2009). Su consumo regular y extendido la posiciona como un componente central de la dieta diaria, lo que le confiere un alto potencial como matriz alimentaria para estrategias de mejora nutricional orientadas a impactar la salud pública. A diferencia de otros alimentos básicos, la tortilla presenta una estructura relativamente simple y una formulación adaptable, lo que facilita la incorporación de ingredientes funcionales sin alterar de manera drástica los hábitos alimentarios tradicionales.

Desde el punto de vista nutrimental, las tortillas elaboradas a partir de maíz nixtamalizado contienen cantidades relevantes de fibra dietaria insoluble y soluble, así como minerales cuya biodisponibilidad se ve favorecida por el tratamiento alcalino, destacando el calcio y la

niacina. Asimismo, conservan una fracción de compuestos bioactivos derivados del grano, principalmente ácidos fenólicos, entre los cuales el ácido ferúlico es el más abundante. Este compuesto se encuentra mayoritariamente en forma ligada a la matriz polisacárida, aunque los procesos de nixtamalización y cocción pueden incrementar su fracción soluble, contribuyendo a la actividad antioxidante del producto final (Serna-Saldívar et al., 2015; de la Parra et al., 2007). No obstante, la concentración de estos compuestos y su funcionalidad dependen del tipo de maíz utilizado y de las condiciones de procesamiento. A pesar de su relevancia nutricional y cultural, la tortilla de maíz presenta limitaciones bien definidas en términos de calidad proteica, ya que hereda el perfil aminoacídico desequilibrado del grano, caracterizado por un bajo contenido de lisina y triptófano. Cuando se consume como fuente principal de proteína, esta deficiencia puede comprometer el aporte adecuado de aminoácidos esenciales, especialmente en contextos donde la dieta carece de diversidad suficiente (Hernández-Uribe et al., 2020). Esta característica ha impulsado el interés por desarrollar tortillas enriquecidas mediante la incorporación de ingredientes proteicos complementarios, capaces de mejorar el valor biológico de la proteína sin modificar de forma significativa las propiedades sensoriales del producto.

La tortilla representa una plataforma tecnológica adecuada para la fortificación con ingredientes de origen vegetal ricos en proteínas, fibra y compuestos bioactivos. Diversos estudios han evaluado la incorporación de leguminosas, harinas de hojas y extractos vegetales, reportando mejoras en el contenido proteico, el perfil aminoacídico y la capacidad antioxidante de las tortillas, aunque con efectos variables sobre color, textura y aceptabilidad sensorial (Palacios-Fonseca et al., 2009; Sánchez-Marroquín et al., 2021). La selección adecuada del ingrediente fortificante y su nivel de inclusión resulta crítica para lograr un equilibrio entre mejora nutricional y calidad tecnológica, particularmente en un alimento de consumo cotidiano como la tortilla.

1.1.7 Antecedentes de tortillas fortificadas: avances y limitaciones

La tortilla de maíz ha sido ampliamente estudiada como vehículo para la incorporación de ingredientes funcionales, debido a su consumo cotidiano, aceptación cultural y relevancia nutricional en la dieta de amplios sectores de la población. Diversos estudios han demostrado que la fortificación de tortillas con ingredientes de origen vegetal puede mejorar de manera significativa su perfil nutrimental, particularmente en términos de fibra dietaria, proteína, micronutrientes y capacidad antioxidante, sin modificar sustancialmente la matriz alimentaria original (Palacios-Fonseca et al., 2009; Sánchez-Marroquín et al., 2021).

Entre las estrategias más exploradas se encuentra la incorporación de fuentes vegetales ricas en fibra y compuestos bioactivos. La adición de nopal deshidratado en la formulación de tortillas ha mostrado incrementos relevantes en el contenido de fibra dietaria total, así como en la presencia de antioxidantes, con efectos potenciales sobre la regulación glucémica y la salud intestinal (Sánchez-Marroquín et al., 2021). De manera similar, la inclusión de semillas como chía ha sido evaluada por su aporte de ácidos grasos poliinsaturados, particularmente omega-3, reportándose mejoras en el perfil lipídico del producto, aunque con efectos dependientes del nivel de inclusión y del impacto sobre la textura y la aceptabilidad

sensorial (Núñez-Sánchez et al., 2020). Otras investigaciones han abordado la fortificación de tortillas mediante la adición de ingredientes con alto contenido proteico y mineral. El uso de microalgas como *Spirulina spp.* ha sido propuesto como una estrategia para incrementar el contenido de proteína, hierro y otros micronutrientes esenciales, observándose mejoras en la biodisponibilidad mineral; sin embargo, estos beneficios suelen acompañarse de cambios marcados en el color y el sabor del producto, lo que puede limitar su aceptación por parte del consumidor (Olvera et al., 2016). De forma análoga, la incorporación de harinas de leguminosas ha demostrado ser efectiva para mejorar el perfil aminoacídico de las tortillas, aunque su impacto sobre la textura, la cohesividad de la masa y el inflado durante la cocción continúa siendo un desafío tecnológico relevante (Palacios-Fonseca et al., 2009).

A pesar de los avances reportados, la literatura evidencia limitaciones recurrentes en el desarrollo de tortillas fortificadas. Entre las principales se encuentran las alteraciones en propiedades tecnológicas críticas, como la rolabilidad, la elasticidad, el inflado y la pérdida de humedad durante la cocción, así como cambios en el color y el sabor que pueden afectar la aceptación sensorial del producto final. Además, muchos estudios se centran en la mejora de uno o dos componentes nutricionales específicos, sin evaluar de manera integral la interacción entre composición, funcionalidad biológica y calidad tecnológica, lo que dificulta la extrapolación de los resultados a contextos de consumo real y producción a mayor escala (Sánchez-Marroquín et al., 2021).

1.1.8 *Moringa oleifera*: composición, usos y potencial funcional

Moringa oleifera es una especie arbórea perteneciente a la familia *Moringaceae*, originaria del subcontinente indio y actualmente distribuida en regiones tropicales y subtropicales de Asia, África y América Latina. Entre las trece especies descritas del género *Moringa*, *M. oleifera* es la más estudiada y utilizada debido a su elevada densidad nutrimental y a la diversidad de aplicaciones atribuidas a sus diferentes partes, particularmente a las hojas, que han sido empleadas tradicionalmente con fines alimentarios y medicinales (Fahey, 2005; Gopalakrishnan et al., 2016).



Figura 2. Hojas de *Moringa oleifera* secas.

Desde el punto de vista nutricional, las hojas de *M. oleifera* se caracterizan por un alto contenido de proteína vegetal, fibra dietaria y minerales, destacando calcio, hierro y potasio, así como vitaminas liposolubles e hidrosolubles, entre ellas provitamina A (β -caroteno), vitamina C y vitaminas del complejo B. La fracción proteica de las hojas presenta un perfil aminoacídico más balanceado que el de otros vegetales comúnmente utilizados en la alimentación humana, con presencia de aminoácidos esenciales como lisina, leucina e isoleucina, lo que ha motivado su estudio como ingrediente potencial para mejorar la calidad proteica de alimentos de origen vegetal (Fahey, 2005; Asensi et al., 2017; Khor et al., 2018). Además de su valor nutricional, *M. oleifera* ha sido ampliamente documentada por su riqueza en compuestos bioactivos y su uso en la medicina tradicional. Las hojas se han incorporado en forma de polvo, extractos o como ingrediente funcional en alimentos procesados y suplementos dietéticos, principalmente por su aporte de metabolitos asociados con actividad antioxidante y efectos biológicos relevantes. Estas propiedades han despertado un creciente interés en su aplicación dentro del desarrollo de alimentos funcionales orientados a la prevención de alteraciones metabólicas y enfermedades crónicas (Gopalakrishnan et al., 2016; Castro-López et al., 2017).

El cultivo de *M. oleifera* ha adquirido importancia como alternativa productiva en zonas rurales, particularmente en estados como Michoacán, Oaxaca, Puebla y Quintana Roo. De acuerdo con información del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, Michoacán concentra la mayor parte de la producción nacional de hojas de moringa, lo que representa una oportunidad para su aprovechamiento local como ingrediente funcional en el desarrollo de alimentos con valor agregado, especialmente aquellos de consumo cotidiano (SIAP, 2020).

1.1.9 Compuestos bioactivos de las hojas de *Moringa oleifera*

Las hojas de *Moringa oleifera* constituyen una fuente relevante de compuestos bioactivos que contribuyen de manera significativa a su potencial funcional. Entre los metabolitos secundarios más estudiados se encuentran los compuestos fenólicos, particularmente flavonoides y ácidos fenólicos, los cuales han sido ampliamente asociados con actividad antioxidante y efectos biológicos benéficos. Dentro del grupo de flavonoides, la quercetina y el kaempferol, junto con sus derivados glicosilados, han sido identificados como componentes predominantes en las hojas de moringa, presentando estructuras químicas capaces de donar electrones o átomos de hidrógeno y neutralizar especies reactivas de oxígeno (Fahey, 2005; Gopalakrishnan et al., 2016; Castro-López et al., 2017). Además de los flavonoides, las hojas de *M. oleifera* contienen diversos ácidos fenólicos, entre los que destacan el ácido clorogénico, el ácido cafeico y el ácido ferúlico. Estos compuestos se encuentran tanto en forma libre como conjugada a la matriz celular y contribuyen de manera importante a la capacidad antioxidante total del material vegetal. La presencia de ácidos

fenólicos ha sido relacionada con la modulación de procesos inflamatorios y con efectos protectores frente al daño oxidativo a lípidos, proteínas y ADN, mecanismos implicados en el desarrollo de enfermedades metabólicas y cardiovasculares (Castro-López et al., 2017; Bhattacharya et al., 2018).

Otro grupo de compuestos bioactivos característico de *M. oleifera* corresponde a los glucosinolatos y sus productos de hidrólisis, principalmente isotiocianatos. Estos compuestos han sido reportados por su actividad antimicrobiana, antiinflamatoria y potencial anticancerígena, atribuida a su capacidad para inducir apoptosis y modular enzimas de desintoxicación de fase II en modelos celulares y animales. En hojas de moringa se han identificado isotiocianatos específicos con estructuras distintas a las presentes en otras crucíferas, lo que ha despertado interés por sus posibles efectos biológicos diferenciados (Gopalakrishnan et al., 2016; Bhattacharya et al., 2018). Las hojas de *M. oleifera* también aportan vitaminas con actividad antioxidante, particularmente vitamina C y carotenoides con actividad provitaminica A, los cuales pueden actuar de manera sinérgica con los compuestos fenólicos. Esta interacción entre distintos metabolitos antioxidantes contribuye a la elevada capacidad antioxidante reportada para polvos y extractos de hojas de moringa, aunque la concentración y estabilidad de estos compuestos puede verse influenciada por factores como el método de secado, el procesamiento y la forma de incorporación en matrices alimentarias (Fahey, 2005; Khor et al., 2018).

1.1.10 Concentrado proteico de *Moringa oleifera*

Las hojas de *Moringa oleifera* destacan por su elevado contenido proteico, que puede representar entre 20 y 30 % del peso seco, dependiendo de la variedad, la etapa de cosecha y las condiciones de procesamiento. Este contenido es superior al de muchas hortalizas y comparable al de algunas leguminosas, lo que ha motivado su estudio como fuente alternativa de proteína vegetal para aplicaciones alimentarias y nutraceuticas (Fahey, 2005; Gopalakrishnan et al., 2016). La fracción proteica de las hojas presenta un perfil aminoacídico relativamente equilibrado, con presencia de aminoácidos esenciales como lisina, leucina, isoleucina, valina y triptófano, característica particularmente relevante para complementar matrices alimentarias basadas en cereales, como el maíz, que son deficitarias en estos aminoácidos.

Además de su contenido y perfil aminoacídico, las proteínas de *M. oleifera* han mostrado una digestibilidad moderada a alta en comparación con otras fuentes vegetales, lo que favorece su aprovechamiento biológico. Estudios previos han señalado que, aunque la presencia de fibra dietaria y compuestos fenólicos puede influir en la digestibilidad proteica de la hoja entera, la concentración y purificación parcial de la fracción proteica permite mejorar su disponibilidad y reducir la interferencia de componentes no proteicos (Gopalakrishnan et al., 2016; Khor et al., 2018). Esta característica resulta especialmente relevante cuando se busca utilizar la moringa como ingrediente funcional en alimentos procesados. El uso de concentrados proteicos derivados de hojas de *M. oleifera* ofrece ventajas frente a la incorporación directa de la harina de hoja completa. La obtención de un concentrado permite incrementar la densidad proteica del ingrediente, estandarizar su composición y minimizar efectos indeseables asociados con la fibra, el color intenso o el

sabor característico de la hoja, factores que pueden afectar la aceptabilidad sensorial y las propiedades tecnológicas de productos como la tortilla de maíz. Asimismo, el empleo de técnicas de extracción suaves, como métodos asistidos por ultrasonido en medio acuoso, ha sido propuesto como una alternativa eficiente para liberar proteínas vegetales manteniendo su funcionalidad y reduciendo el uso de solventes orgánicos (Castro-López et al., 2017).

El concentrado proteico de *M. oleifera* representa una estrategia adecuada para mejorar la calidad proteica de productos tradicionales de amplio consumo. Su incorporación en matrices basadas en maíz nixtamalizado permite abordar de manera directa la deficiencia de aminoácidos esenciales característica del cereal, al tiempo que se aprovechan las propiedades nutrimentales y funcionales de la moringa en una forma tecnológicamente más controlada y compatible con procesos de transformación térmica.

1.2 Justificación

El presente proyecto tiene como objetivo la elaboración de tortillas a base de maíz criollo de la región de la Meseta Purépecha, en Michoacán, enriquecidas con harina de hojas de *Moringa oleifera*, con la finalidad de mejorar su perfil nutricional, particularmente en términos de contenido proteico y propiedades funcionales. Aunque las tortillas representan una fuente fundamental de energía y carbohidratos en la dieta mexicana, presentan limitaciones en su calidad proteica debido a la deficiencia de aminoácidos esenciales. La adición de harina de hojas de moringa, caracterizada por su elevado contenido proteico y su aporte de compuestos bioactivos como flavonoides y ácidos fenólicos, permite complementar las deficiencias nutricionales del maíz y potenciar su capacidad antioxidante. Este enfoque busca optimizar la calidad nutricional de un alimento de consumo cotidiano, al mismo tiempo que promueve el aprovechamiento de recursos vegetales locales con potencial funcional, contribuyendo a la seguridad alimentaria, a la valorización de la biodiversidad agrícola y al fortalecimiento de las economías rurales en comunidades productoras de maíz criollo.

1.3 Hipótesis

La adición de harina de hojas de *Moringa oleifera* a la tortilla de maíces criollos permitirá obtener un alimento tipo funcional con mayor contenido proteico y de compuestos bioactivos.

1.4 Objetivo general

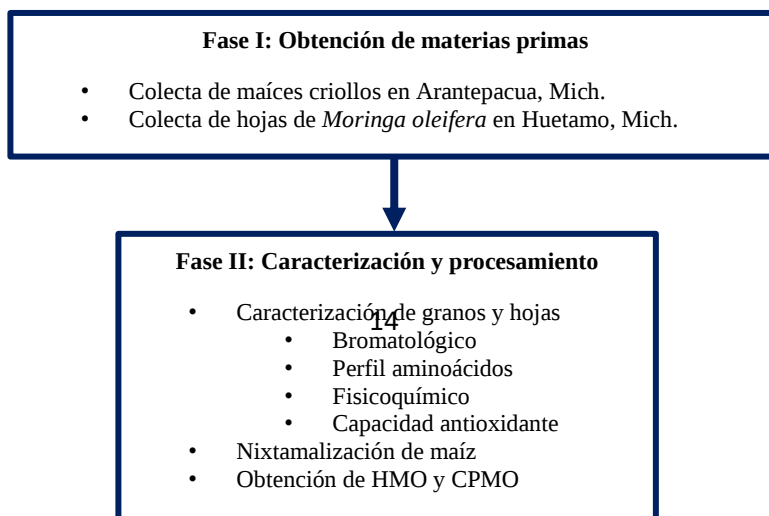
Desarrollar y caracterizar tortillas a base de maíces criollos adicionadas con harina de hojas de *Moringa oleifera*, evaluando sus propiedades funcionales con el fin de obtener un alimento con mayor contenido proteico y de compuestos bioactivos.

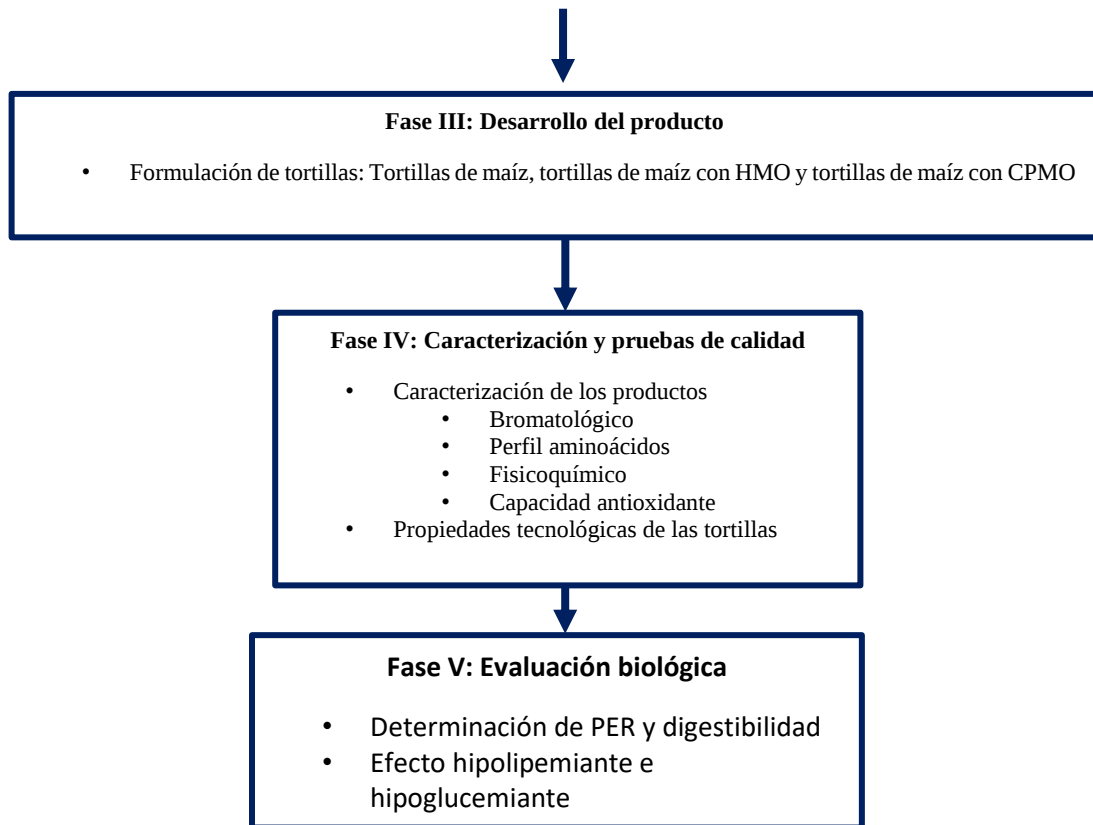
1.4.1 Objetivos específicos

- Caracterizar física, química y nutrimentalmente maíces criollos recolectados en la región Purépecha del estado de Michoacán.
- Determinar la composición proximal, el perfil de aminoácidos y el contenido de compuestos bioactivos de harinas de maíz nixtamalizado y de *Moringa oleifera*.
- Desarrollar tortillas fortificadas con *Moringa oleifera* y evaluar su composición nutrimental, actividad antioxidante y propiedades tecnológicas.
- Evaluar la calidad proteica y los efectos metabólicos asociados al consumo de tortillas fortificadas en modelos biológicos experimentales

1.5 Estrategia experimental

La estrategia experimental se estructuró en etapas consecutivas que abarcaron la selección y caracterización de materias primas, su procesamiento tecnológico, la elaboración de tortillas fortificadas y la evaluación nutricional y metabólica mediante un modelo biológico, con el fin de integrar los aspectos composicionales y biológicos del estudio.





1.6 Literatura citada

- Altieri, M. A. (2009). Agroecology, small farms, and food sovereignty. *Monthly Review*, 61(3), 102–113.
- Anderson, J. W., Baird, P., Davis, R. H., Ferreri, S., Knudtson, M., Koraym, A., Waters, V., & Williams, C. L. (2009). Health benefits of dietary fiber. *Nutrition Reviews*, 67(4), 188–205.
- Asensi, A., Ortega, A., & Pérez-Gregorio, R. (2017). Phenolic compounds from *Moringa oleifera* leaves: Antioxidant and anti-inflammatory activity. *Journal of Food Biochemistry*, 41(4), e12315.
- Bhattacharya, A., Tiwari, P., Sahu, P. K., & Kumar, S. (2018). A review of the phytochemical and pharmacological characteristics of *Moringa oleifera*. *Journal of Pharmaceutical Bioallied Sciences*, 10(4), 181–191.
- Bressani, R. (1990). Protein quality of maize. *Food and Nutrition Bulletin*, 12(2), 1–7.
- Bressani, R. (2008). Maize and maize products in human nutrition. *FAO Food and Nutrition Series No. 25*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Castro-López, C., Rojas, R., Sánchez-Alejo, E. J., Niño-Medina, G., & Martínez-Ávila, G. C. G. (2017). Bioactive compounds in *Moringa oleifera* leaves: Influence of drying process. *Journal of Food Science*, 82(8), 1978–1986.
- CONABIO. (2012). La diversidad del maíz en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- de la Parra, C., Serna-Saldívar, S. O., & Liu, R. H. (2007). Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn for production of masa, tortillas, and tortilla chips. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(10), 4177–4183.
- Del Rio, D., Rodriguez-Mateos, A., Spencer, J. P. E., Tognolini, M., Borges, G., & Crozier, A. (2013). Dietary polyphenolics in human health: Structures, bioavailability, and evidence of protective effects. *Antioxidants & Redox Signaling*, 18(14), 1818–1892.
- FAO/WHO. (2007). Protein and amino acid requirements in human nutrition (WHO Technical Report Series No. 935). World Health Organization.
- FAO/WHO. (2013). Dietary protein quality evaluation in human nutrition (FAO Food and Nutrition Paper No. 92). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2022). FAOSTAT: Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Fahey, J. W. (2005). *Moringa oleifera*: A review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties. *Trees for Life Journal*, 1(5), 1–15.

- González-Abuín, N., Martínez-Micaelo, N., Blay, M., Pujadas, G., García-Vallvé, S., & Ardévol, A. (2015). Grape seed proanthocyanidins improve lipid metabolism and insulin resistance in diet-induced obese rats. *International Journal of Obesity*, 39, 47–55.
- Gopalakrishnan, L., Doriya, K., & Kumar, D. S. (2016). *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. *Food Science and Human Wellness*, 5(2), 49–56.
- Grundy, S. M. (2016). Metabolic syndrome update. *Trends in Cardiovascular Medicine*, 26(4), 364–373.
- Gwirtz, J. A., & García-Casal, M. N. (2014). Processing maize flour and corn meal food products. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312, 66–75.
- Hernández-Urbe, J. P., Ramos-Gómez, M., Salinas-Moreno, Y., & Bello-Pérez, L. A. (2020). Phenolic compounds and antioxidant activity of pigmented maize tortillas. *Food Chemistry*, 305, 125491.
- Khor, K. Z., Lim, V., Moses, E. J., & Samad, N. A. (2018). The in vitro and in vivo anticancer properties of *Moringa oleifera*. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2018, 1–14.
- Leakey, R. R. B., Tchoundjeu, Z., Schreckenberg, K., Shackleton, S. E., & Shackleton, C. M. (2006). Agroforestry tree products (AFTPs): Targeting poverty reduction and enhanced livelihoods. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 3(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/14735903.2006.9684741>
- Liu, R. H. (2013). Dietary bioactive compounds and their health implications. *Journal of Food Science*, 78(Suppl. 1), A18–A25.
- López-Martínez, L. X., Oliart-Ros, R. M., Valerio-Alfaro, G., Lee, C. H., Parkin, K. L., & García, H. S. (2009). Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *LWT – Food Science and Technology*, 42(6), 1187–1192.
- López-Martínez, L. X., Parkin, K. L., & García, H. S. (2011). Phase II-inducing, polyphenols content and antioxidant capacity of corn (*Zea mays* L.) from phenotypes of white, yellow, red and purple colors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(16), 8521–8529.
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sanchez, J., Buckler, E., & Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(9), 6080–6084.
- Mbikay, M. (2012). Therapeutic potential of *Moringa oleifera* leaves in chronic hyperglycemia and dyslipidemia: A review. *Frontiers in Pharmacology*, 3, 24.
- Mora-Rochín, S., Gutiérrez-Urbe, J. A., Serna-Saldívar, S. O., Sánchez-Peña, P., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of tortillas

produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 502–508.

Núñez-Sánchez, M. A., González-Sarrias, A., García-Villalba, R., Monedero-Saiz, T., García-Talavera, N. V., Gómez-Sánchez, M. B., & Espín, J. C. (2020). Gene expression changes induced by phenolic compounds: Implications for health. *Molecular Nutrition & Food Research*, 64(2), 1900411.

Olvera, M. E., Gómez-Aldapa, C. A., & Castro-Rosas, J. (2016). Nixtamalization: Changes in nutritional quality and bioactive compounds. *Food Reviews International*, 32(2), 115–134.

Paes, M. C. D. (2006). Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho. *Embrapa Milho e Sorgo*.

Palacios-Fonseca, A. J., Vázquez-Ramos, C., Rodríguez-García, M. E., Hernández-Urbe, J. P., & Bello-Pérez, L. A. (2009). Physicochemical, structural and nutritional properties of nixtamalized maize flour. *Food Chemistry*, 115(2), 649–656.

Pérez-Terrazas, S., Astier, M., & Merlín-Urbe, Y. (2019). Agrobiodiversity conservation through traditional maize systems in Michoacán, Mexico. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 43(7–8), 894–915.

Piperno, D. R., Ranere, A. J., Holst, I., Iriarte, J., & Dickau, R. (2009). Starch grain and phytolith evidence for early ninth millennium B.P. maize from the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(13), 5019–5024.

Prasanna, B. M., Vasal, S. K., Villegas, S. M., & Paleta, L. F. (2001). Quality protein maize. *Current Science*, 81(10), 1308–1319.

Rosado, J. L., Cassís, L., Solano, L., & Duarte-Vázquez, M. A. (2005). Nutritional quality of tortillas fortified with maize protein fractions. *Journal of Food Science*, 70(8), S573–S579.

Salinas-Moreno, Y., Soto-Hernández, M., Martínez-Bustos, F., & Gómez-Montiel, N. (2012). Anthocyanins and antioxidant activity in maize grains. *Food Science and Technology International*, 18(6), 537–545.

Salinas-Moreno, Y., Santiago-Ramos, D., & López-Martínez, L. X. (2019). Bioactive compounds and antioxidant capacity of pigmented maize varieties. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(3), 255–263.

Sánchez-Marroquín, A., Santiago-Ramos, D., Hernández-Urbe, J. P., & Bello-Pérez, L. A. (2021). Bioactive compounds and antioxidant activity of traditional maize foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 98, 103810.

Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. D., Mariscal-Moreno, R. M., & Hernández-Urbe, J. P. (2018). Effect of nixtamalization on phenolic compounds and antioxidant capacity of maize tortillas. *Food Chemistry*, 239, 114–121.

Serna-Saldívar, S. O. (2010). *Cereal grains: Properties, processing, and nutritional attributes*. CRC Press.

Schnable, P. S., Ware, D., Fulton, R. S., Stein, J. C., Wei, F., Pasternak, S., Liang, C., Zhang, J., Fulton, L., Graves, T. A., et al. (2009). The B73 maize genome: Complexity, diversity, and dynamics. *Science*, 326(5956), 1112–1115. <https://doi.org/10.1126/science.1178534>

SIAP. (2020). *Producción agrícola de maíz en México*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.

Slavin, J. L. (2013). Dietary fiber and body weight. *Nutrition*, 21(3), 411–418.

Staller, J. E., Tykot, R. H., & Benz, B. F. (2010). *Histories of maize: Multidisciplinary approaches to the prehistory, linguistics, biogeography, domestication, and evolution of maize*. Academic Press.

Vergara-Jiménez, M., Almatrafi, M. M., & Fernández, M. L. (2017). Bioactive components in *Moringa oleifera* leaves protect against chronic disease. *Antioxidants*, 6(4), 91.

Capítulo II: Caracterización de maíces criollos y harinas nixtamalizadas

2.1 Resumen

En este capítulo se evaluó la calidad nutricional y funcional de maíces criollos azul, blanco y rojo provenientes de la Meseta Purépecha de Michoacán y de sus harinas nixtamalizadas, considerando la importancia de estas variedades como materia prima para el desarrollo de alimentos con valor agregado. El objetivo fue caracterizar sus propiedades físicas, composición nutrimental y contenido de compuestos bioactivos, así como su capacidad antioxidante. Se determinaron propiedades físicas del grano, composición proximal mediante métodos AOAC, perfil de aminoácidos, contenido de compuestos fenólicos totales y antocianinas, y actividad antioxidante mediante los ensayos ABTS^{•+} y DPPH[•]. Los resultados mostraron contenidos de proteína en grano entre 12.17 y 12.49% (base seca) y fibra dietética superior en los maíces pigmentados. El maíz rojo presentó el mayor contenido total de aminoácidos (6.09 g/100 g de muestra) y mayores concentraciones de lisina y triptófano respecto al maíz blanco y azul. Asimismo, los maíces pigmentados exhibieron mayor contenido de compuestos fenólicos y mayor actividad antioxidante, con diferencias significativas ($p < 0.05$) en los valores de ABTS^{•+} y DPPH[•]. La nixtamalización redujo moderadamente el contenido de proteína y compuestos fenólicos; sin embargo, las harinas pigmentadas conservaron fracciones importantes de fibra y actividad antioxidante.

2.2 Introducción

La caracterización de materias primas constituye una etapa fundamental en el desarrollo de alimentos funcionales, particularmente cuando se emplean cultivos nativos que presentan una elevada variabilidad genética y composicional, como los maíces criollos. Las propiedades físicas y químicas del grano influyen de manera directa en su comportamiento durante el procesamiento y determinan, en gran medida, la calidad tecnológica y nutrimental de los productos derivados. En el maíz, parámetros como el tamaño y la forma del grano, el peso hectolítrico, la dureza del endospermo, el contenido de humedad y el color han sido asociados con la eficiencia de la nixtamalización y con la calidad de la masa y la tortilla obtenidas (Serna-Saldívar, 2010; Arámbula-Villa et al., 2001).

Los maíces criollos pigmentados presentan un interés particular debido a las diferencias estructurales y composicionales entre variedades, las cuales se reflejan tanto en atributos físicos del grano como en el contenido de macronutrientes y compuestos bioactivos. Estudios previos han documentado que estas variedades pueden presentar concentraciones más elevadas de compuestos fenólicos y una mayor capacidad antioxidante en comparación con maíces no pigmentados, aunque dichas características dependen del genotipo y de las condiciones ambientales de cultivo (López-Martínez et al., 2009; Mora-Rochín et al., 2010). Esta variabilidad hace necesaria una caracterización detallada que permita establecer comparaciones entre variedades y sustentar su selección para aplicaciones alimentarias con enfoque funcional. El procesamiento tradicional del maíz mediante nixtamalización induce modificaciones relevantes en la estructura del grano, particularmente en el pericarpio, el endospermo y la matriz proteica-amilácea, lo que repercute en la composición y disponibilidad de nutrientes. Diversos autores han señalado que el tratamiento alcalino puede

favorecer la biodisponibilidad de minerales como el calcio, modificar la digestibilidad proteica y alterar la fracción de compuestos fenólicos, ya sea por pérdidas térmicas o por la liberación de compuestos previamente ligados a la pared celular (Bressani, 2008; de la Parra et al., 2007; Santiago-Ramos et al., 2018). En este sentido, la evaluación comparativa del grano crudo y de las harinas nixtamalizadas resulta esencial para comprender el impacto del proceso sobre la calidad nutrimental del maíz.

La determinación de la composición bromatológica, el perfil de aminoácidos y la actividad antioxidante de las harinas nixtamalizadas permite establecer una línea base para interpretar los cambios inducidos por el procesamiento y para evaluar su potencial como matrices alimentarias en el desarrollo de productos fortificados. Esta información es particularmente relevante cuando se pretende incorporar ingredientes funcionales de origen vegetal, ya que la interacción entre la matriz del maíz y los compuestos adicionados puede depender de las características iniciales del grano y de su comportamiento durante la nixtamalización (Serna-Saldívar, 2010; Palacios-Fonseca et al., 2009).

En este capítulo se presenta la caracterización física de los granos de maíz criollo recolectados en la región Purépecha del estado de Michoacán, así como la evaluación bromatológica, fisicoquímica y capacidad antioxidante de los granos de maíz así como de las harinas obtenidas tras el proceso de nixtamalización, con el propósito de establecer su potencial nutrimental y tecnológico como base para el desarrollo posterior de tortillas fortificadas.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Origen y colecta de los maíces

Se colectaron tres variedades de maíz criollo (*Zea mays L.*) de la localidad de Arantepacua, ubicada en la región Purépecha del estado de Michoacán, México. Las variedades seleccionadas correspondieron a granos de color blanco, azul y rojo, representativos de los materiales tradicionalmente cultivados y utilizados para autoconsumo en la región. La colecta se realizó directamente en parcelas de productores locales durante el ciclo agrícola correspondiente.

Las muestras fueron trasladadas al laboratorio en condiciones secas y ventiladas, donde se procedió a su limpieza manual para eliminar impurezas, granos dañados y material extraño. La identificación de las razas de maíz se realizó con apoyo del herbario de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, siguiendo criterios morfológicos descritos previamente para maíces criollos mexicanos.



Figura 3. Arantepacua, zona de cultivo. 19.59354° N, 101.968764° O

2.3.2 Propiedades físicas y fisicoquímicas de los granos de maíz

- 1 Las propiedades físicas de los granos se evaluaron con el objetivo de caracterizar diferencias entre variedades criollas. El tamaño del grano se determinó mediante la medición del largo, ancho y espesor de 100 granos seleccionados aleatoriamente, utilizando un vernier digital.
- 2 El peso de mil granos se obtuvo pesando directamente 1000 granos en una balanza analítica.
- 3 El contenido de humedad se cuantificó siguiendo el método 44-19 de la AACC (2000), mientras que el pH se determinó conforme al método oficial 02-52 de la misma asociación.
- 4 El índice de flotación se evaluó de acuerdo con la norma NMX-FF-034/2-SCFI-2003, utilizando una solución de nitrato de sodio ajustada a una densidad de 1.250 g/mL. Para ello, se colocaron 100 granos libres de impurezas en la solución, se separaron cuidadosamente mediante agitación suave y se contabilizó el número de granos flotantes después de un minuto, expresando el resultado como porcentaje.
- 5 El color de los granos se determinó mediante un colorímetro portátil (BYK-Gardner®, EUA), registrándose los parámetros de luminosidad (L^*), croma y ángulo de matiz (hue), con el fin de caracterizar objetivamente las diferencias asociadas a la pigmentación del grano.

2.3.3 Preparación de harinas nixtamalizadas

La obtención de harinas nixtamalizadas se realizó siguiendo un procedimiento tradicional previamente descrito, con ligeras adecuaciones (Zavala, 2015). Para cada variedad de maíz, se mezcló 1 kg de grano con 2 L de agua potable y 10 g de hidróxido de calcio. La mezcla se sometió a cocción en estufa de gas hasta alcanzar una temperatura aproximada de 92 °C, manteniéndose por un periodo de 40–45 minutos.



Figura 4. Nixtamalización del maíz

Una vez finalizada la cocción, los granos se dejaron reposar en el mismo líquido de cocción (nejayote) durante 16 h a temperatura ambiente. Posteriormente, el nejayote fue decantado y los granos nixtamalizados se lavaron con 2 L de agua potable por kilogramo de maíz para eliminar el exceso de hidróxido de calcio y parte del pericarpio desprendido. El nixtamal obtenido se molió en un molino de piedras (FUMASA®) para la obtención de masa, la cual se deshidrató en un equipo de secado tipo flash y se pulverizó hasta obtener harina con tamaño de partícula homogéneo.



Figura 5. Proceso de molienda, secado y pulverización del nixtamal.

2.3.4 Caracterización bromatológica de las harinas y granos de maíz

La caracterización bromatológica de las harinas nixtamalizadas se realizó mediante la determinación de humedad, cenizas, proteína cruda y extracto etéreo, utilizando métodos oficiales de la AACC (2000). El contenido de proteína se calculó a partir del nitrógeno total determinado por el método correspondiente, empleando el factor de conversión adecuado. El contenido de carbohidratos totales se estimó por diferencia, restando de 100 la suma de humedad, proteína, extracto etéreo y cenizas.

2.3.5 Caracterización fisicoquímica de las harinas

El pH de las harinas se determinó conforme al método 02-52 de la AACCC (2000). El color se evaluó utilizando el mismo colorímetro portátil empleado para los granos, registrando los parámetros L*, croma y ángulo hue. La actividad de agua (A_w) se determinó mediante un equipo LabSwift-aw (NOVASINA®).

2.3.6 Obtención de extractos para la evaluación de la capacidad antioxidante

Los extractos se obtuvieron mediante extracción asistida por ultrasonido a partir de las muestras secas y molidas, empleando una relación sólido:solvente de 1:20 (p/v) con etanol al 30 % (v/v). La extracción se realizó durante 20 minutos, a una temperatura de 50 °C y 30 % de amplitud. Posteriormente, las suspensiones se centrifugaron y el sobrenadante se filtró al vacío para su uso en la determinación de compuestos fenólicos, flavonoides totales y capacidad antioxidante. Los extractos se mantuvieron protegidos de la luz y refrigerados hasta su análisis.

2.3.7 Determinación de compuestos fenólicos y flavonoides totales

El contenido de compuestos fenólicos totales se determinó mediante el método colorimétrico de Folin–Ciocalteu, de acuerdo con lo descrito por Makkar et al. (1993), con modificaciones menores reportadas por Treviño et al. (2017). Para ello, se mezclaron 250 μ L del extracto con 250 μ L del reactivo Folin–Ciocalteu (2 N) y 250 μ L de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 20%. La mezcla se agitó y se incubó a 40 °C durante 30 min. Posteriormente, se adicionaron 2 mL de agua destilada y se homogeneizó nuevamente. La absorbancia se midió a 750 nm empleando un espectrofotómetro (VELAB®, EUA). El contenido de fenólicos totales se cuantificó utilizando ácido gálico como estándar y los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra (mg EAG/g).

El contenido de flavonoides totales se evaluó siguiendo el método descrito por Liu et al. (2002). Se mezclaron 150 μ L del extracto con 150 μ L de NaNO_2 al 5% y se dejó reaccionar durante 5 min. Posteriormente, se añadieron 150 μ L de AlCl_3 al 10% y 1 mL de NaOH 0.1 M, agitándose la mezcla hasta homogeneizar. La absorbancia se registró a 510 nm en un espectrofotómetro (VELAB®, EUA). La cuantificación se realizó utilizando quercetina como estándar y los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de quercetina por gramo de muestra (mg EQ/g).

2.3.8 Evaluación de la capacidad antioxidante

La actividad antioxidante se determinó mediante los ensayos de captura de radicales DPPH• y ABTS•+, utilizando métodos espectrofotométricos ampliamente reportados.

El ensayo de DPPH• se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito por Randhir y Shetty (2007), con modificaciones propuestas por Treviño et al. (2017). Se midió la absorbancia a 517 nm utilizando un espectrofotómetro (VELAB®, EUA). Los resultados se expresaron como concentración inhibitoria media (IC50) del radical DPPH•, calculado mediante la ecuación

La actividad antioxidante mediante el radical ABTS•+ se determinó conforme al método descrito por Re et al. (1999). Para la generación del radical, se preparó una solución madre mezclando ABTS (7 mM) y persulfato de potasio (2.45 mM) en una proporción 2:1 (v/v), la cual se dejó reposar a temperatura ambiente durante 16 h en oscuridad. Posteriormente, la solución se diluyó con etanol hasta ajustar una absorbancia de 0.70 ± 0.02 a 734 nm. Se midió la absorbancia a 734 nm en un espectrofotómetro (VELAB®, EUA). Los resultados se expresaron como concentración inhibitoria media (IC50) del radical ABTS•+.

2.3.9 Determinación del perfil de aminoácidos

El perfil de aminoácidos de las harinas nixtamalizadas se determinó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), previo proceso de hidrólisis ácida de las proteínas, siguiendo procedimientos estandarizados para la cuantificación de aminoácidos en matrices alimentarias. La identificación y cuantificación de los aminoácidos se realizó mediante comparación de los tiempos de retención y áreas de los picos cromatográficos con estándares comerciales certificados. Los resultados se expresaron como miligramos de aminoácido por 100 gramos de muestra.

2.3.10 Análisis estadístico

Los resultados se expresan como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey, utilizando un nivel de significancia de $p \leq 0.05$ para detectar diferencias significativas entre tratamientos. El análisis estadístico se realizó utilizando el software RStudio®.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Caracterización física del grano de maíz

La caracterización física de los granos de maíz permitió identificar diferencias morfológicas entre las variedades criollas azul, blanca y roja recolectadas en la región Purépecha. El análisis del tamaño del grano mostró variaciones significativas en las dimensiones de largo, ancho y espesor (Tabla 1), reflejando la diversidad estructural propia de los maíces criollos. Estas diferencias son relevantes desde un punto de vista tecnológico, ya que se ha reportado que granos de mayor tamaño y volumen presentan una mayor capacidad de hidratación, lo que favorece una cocción más homogénea y eficiente durante la nixtamalización (Salinas-Moreno et al., 2010; Serna-Saldívar, 2010).

El peso de mil granos (PMG) es un parámetro ampliamente utilizado para estimar el tamaño, densidad y proporción de endospermo del grano, así como su rendimiento potencial en procesos de molienda. En el presente estudio, todas las variedades evaluadas presentaron valores superiores a 300 g, umbral considerado adecuado para aplicaciones industriales y artesanales en la elaboración de masa y tortillas (Aguayo-Rojas et al., 2012). En particular, el maíz rojo mostró el valor más elevado de PMG (460.5 g), lo que sugiere una mayor proporción de endospermo harinoso y un potencial favorable para la obtención de harinas con buen rendimiento, en concordancia con lo reportado por Salinas y Vázquez (2006) para maíces destinados a la producción de harina de calidad.



Maíz azul

Maíz blanco

Maíz rojo

Figura 6. Maíces criollos pigmentados y no pigmentados

La dureza del grano, estimada mediante el índice de flotación, constituye un criterio clave para definir las condiciones de cocción durante la nixtamalización. Valores elevados de índice de flotación se asocian con granos suaves o muy suaves, los cuales requieren tiempos de cocción más cortos y favorecen la conservación parcial del pericarpio, contribuyendo a una mejor cohesión de la masa y a propiedades reológicas adecuadas en la tortilla (Martínez-Bustos et al., 2001; Arámbula-Villa et al., 2001). En este estudio, los maíces azul y blanco se clasificaron como muy suaves, mientras que el maíz rojo presentó una dureza suave, lo que permitió ajustar los tiempos de cocción entre 25 y 30 minutos, optimizando el proceso de nixtamalización sin comprometer la calidad del producto final.

Tabla 1. Caracterización física de los granos de maíz.

Parámetro		Maíz azul	Maíz blanco	Maíz rojo
Tamaño del grano (mm)	Largo	11.27 ± 1.57^b	13.5 ± 1.32^a	12.30 ± 1.38^a

Ancho	9.04 ± 0.94 ^b	9.73 ± 1.16 ^a	9.28 ± 1.0 ^b
Espesor	5.27 ± 1.38 ^a	4.85 ± 1.16 ^b	5.36 ± 1.63 ^a
PMG (g)	411.8 ± 4.75 ^b	415.5 ± 4.40 ^b	460.5 ± 7.60 ^a
IF (%)	91 ^a	91 ^a	75 ^b
Dureza	Muy suave	Muy suave	Suave

Valor medio calculado a partir de tres réplicas ± desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

2.4.2 Caracterización fisicoquímica de los granos de maíz

Las propiedades fisicoquímicas de los granos de maíz criollo evaluados se resumen en la Tabla 2. El pH de los granos presentó valores cercanos a la neutralidad, con 6.75 para la variedad azul, 6.74 para la blanca y 6.68 para la roja, sin diferencias significativas entre ellas. Estos valores concuerdan con lo reportado previamente para maíces criollos y comerciales, cuyos pH suelen oscilar entre 6.4 y 6.8 (Zavala, 2015; Serna-Saldívar, 2010). Un pH cercano a la neutralidad es característico del grano de maíz y resulta relevante desde el punto de vista tecnológico, ya que favorece la acción del tratamiento alcalino durante la nixtamalización, facilitando la eliminación del pericarpio y la modificación parcial del almidón, además de contribuir a la estabilidad de los compuestos bioactivos presentes en el grano.

El contenido de humedad de los granos mostró diferencias significativas entre variedades, con valores de 11.61 % para el maíz azul, 10.18 % para el blanco y 9.65 % para el rojo. Todos los valores se encontraron por debajo del límite máximo establecido por la NOM-247-SSA1-2008 (15 %), lo que indica condiciones adecuadas de manejo y almacenamiento. Niveles de humedad dentro de este rango son deseables, ya que reducen el riesgo de deterioro microbiológico y de pérdidas de calidad durante el almacenamiento, además de favorecer una hidratación más controlada del grano durante la nixtamalización (Salinas-Moreno et al., 2010).

La evaluación del color del grano, realizada mediante el sistema CIE Lab*, evidenció diferencias marcadas entre las variedades criollas analizadas. El maíz blanco presentó el mayor valor de luminosidad (L^*), reflejando una mayor capacidad de reflejar la luz, mientras que el maíz azul mostró el valor más bajo, asociado a su tonalidad oscura y a la presencia de pigmentos fenólicos, principalmente antocianinas. En el eje a^* , el maíz rojo presentó los valores más elevados, indicando una mayor tendencia hacia tonalidades rojizas, atribuibles a la presencia de carotenoides y flavonoides específicos, mientras que el maíz azul y el blanco mostraron valores bajos e intermedios, respectivamente. En cuanto al parámetro b^* , los valores más altos correspondieron a las variedades blanca y roja, reflejando una mayor contribución de tonalidades amarillas, mientras que el maíz azul presentó valores bajos, coherentes con su coloración característica.

Estas diferencias cromáticas concuerdan con lo reportado en estudios previos, donde se ha señalado que la coloración del grano está estrechamente relacionada con la concentración y el tipo de compuestos bioactivos presentes, particularmente antocianinas en maíces azules y carotenoides en variedades rojas y blancas (Salinas-Moreno et al., 2012; López-Martínez et al., 2009). La caracterización objetiva del color resulta, por tanto, un indicador indirecto del potencial nutracéutico de los maíces criollos y constituye un parámetro relevante para su selección en el desarrollo de productos alimentarios con valor funcional.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de los granos de maíz

Parámetro		Maíz azul	Maíz blanco	Maíz rojo
pH		6.75 ± 0.095 ^a	6.74 ± 0.0473 ^a	6.68 ± 0.163 ^a
Humedad (%)		11.61 ± 0.19 ^a	10.18 ± 0.11 ^b	9.65 ± 0.35 ^b
Color	L	19.4 ± 2.53	50.6 ± 4.35	25.0 ± 1.66
	a	0.6 ± 0.43	3.9 ± 0.84	23.4 ± 1.78
	b	3.4 ± 0.47	23.5 ± 1.14	23.7 ± 2.79

Valor medio calculado a partir de tres réplicas ± desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (p<0.05).

2.4.3 Análisis bromatológico de los granos de maíz

La caracterización bromatológica de los granos de maíz criollo azul, blanco y rojo evidenció diferencias composicionales relevantes entre variedades, particularmente en el contenido de proteína, lípidos y fibra dietética, mientras que el contenido de cenizas no mostró variaciones significativas (p > 0.05) (Tabla 3). La similitud en el contenido de ceniza concuerda con lo reportado para maíces criollos y pigmentados, en los cuales la fracción mineral soluble suele ser baja y relativamente estable entre genotipos (Maldonado-Astudillo et al., 2022).

El contenido de proteína de las variedades evaluadas osciló entre 12.17 y 12.49 %, valores que se encuentran dentro del rango reportado para maíces criollos mexicanos y que superan, en general, el contenido proteico típico de variedades híbridas o comerciales, el cual suele situarse entre 7 y 10 % (Serna-Saldívar, 2015). Estos resultados son consistentes con estudios realizados en distintas regiones del país, donde se han documentado contenidos proteicos similares en maíces blancos y pigmentados recolectados en Guerrero y Puebla (Maldonado-Astudillo et al., 2021; Domínguez Escorcia et al., 2024). La retención del pericarpio y de la capa de aleurona en los maíces criollos ha sido señalada como un factor determinante en la conservación de fracciones proteicas relevantes, lo que puede explicar los valores observados

en este estudio (Mora-Rochín et al., 2010). En este contexto, los resultados confirman que los maíces criollos pigmentados pueden igualar o incluso superar el contenido proteico de variedades no pigmentadas, dependiendo de la raza y de las condiciones de cultivo, reforzando su importancia como fuente de aminoácidos para la dieta en comunidades rurales (Martínez et al., 2016).

En cuanto al contenido de lípidos, el maíz rojo presentó los valores más elevados, seguido del maíz azul y del blanco. Estas diferencias han sido asociadas previamente con la presencia de compuestos liposolubles, como carotenoides y tocoferoles, los cuales pueden contribuir al contenido graso total del grano, particularmente en variedades pigmentadas (Padilla et al., 2017). Los valores obtenidos concuerdan con reportes recientes para maíces pigmentados de regiones agroecológicas similares, lo que sugiere una composición lipídica característica de este tipo de materiales (Domínguez Escorcía et al., 2024). La fibra dietética total mostró valores comprendidos entre 9.5 y 10.5 %, con una clara predominancia de la fracción insoluble sobre la soluble, patrón ampliamente descrito para maíces criollos y pigmentados (Salinas-Moreno et al., 2013; Ortiz-Prudencio, 2006). La mayor proporción de fibra insoluble se asocia principalmente a componentes estructurales del pericarpio y la pared celular, mientras que la fracción soluble, aunque minoritaria, puede contribuir a efectos fisiológicos relevantes en la regulación del tránsito intestinal y la respuesta glucémica. Resultados similares han sido reportados recientemente en variedades pigmentadas, confirmando la consistencia de este perfil fibroso (Gogoi et al., 2023).

El contenido de carbohidratos totales, que varió entre 66 y 69 %, reflejó la relación inversa entre la fracción fibrosa y la concentración de almidón, manteniéndose dentro de los rangos característicos de los maíces criollos mexicanos (Serna-Saldívar, 2015). En conjunto, la composición bromatológica observada resalta el potencial de los maíces azul y rojo como materias primas con un perfil nutricional favorable para el desarrollo de alimentos con enfoque funcional, particularmente por su aporte de fibra dietética y proteínas.

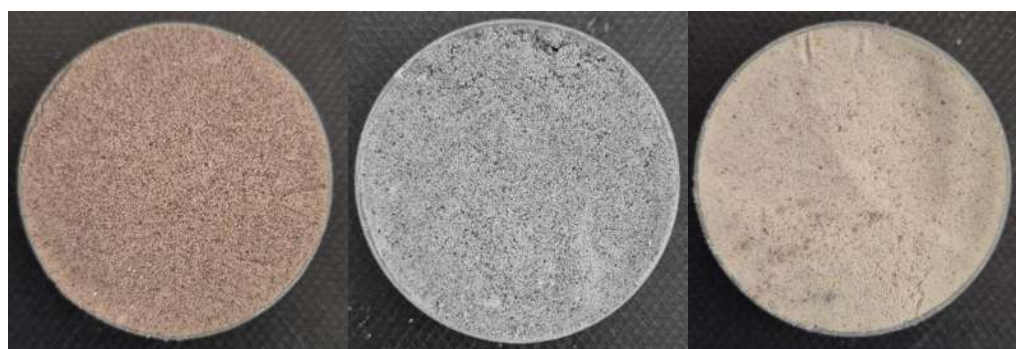
Tabla 3. Caracterización bromatológica de los granos de maíz.

Parámetro	Maíz azul	Maíz blanco	Maíz rojo
Ceniza	1.58 ± 0.03 ^a	1.45 ± 0.22 ^b	1.53 ± 0.04 ^a
Proteína	12.17 ± 0.04 ^b	12.49 ± 0.43 ^a	12.37 ± 0.06 ^a
Lípidos	8.36 ± 0.16 ^a	7.57 ± 0.09 ^b	9.07 ± 0.20 ^a
Fibra soluble	1.62 ± 0.30 ^b	1.64 ± 0.21 ^b	1.70 ± 0.17 ^a
Fibra insoluble	8.83 ± 0.90 ^a	7.86 ± 0.73 ^b	8.80 ± 0.33 ^a
Carbohidratos	67.44 ± 0.9 ^b	68.99 ± 0.7 ^a	66.53 ± 0.2 ^b

Valor medio calculado a partir de tres réplicas ± desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (p<0.05).

2.4.4 Harinas nixtamalizadas de maíz

Tras la caracterización física, fisicoquímica y bromatológica del grano, se evaluaron las harinas nixtamalizadas obtenidas a partir de las tres variedades de maíz criollo. La nixtamalización y la molienda representan etapas críticas que modifican la estructura del grano y pueden inducir cambios en la composición nutrimental, la disponibilidad de compuestos bioactivos y las propiedades funcionales de la matriz. Por ello, la caracterización de las harinas permite evaluar el impacto del procesamiento tradicional sobre los atributos del maíz y establecer una base comparativa para el análisis posterior de productos elaborados a partir de estas harinas.



Harina maíz Rojo

Harina maíz Azul

Harina maíz Blanco

Figura 7. Harinas nixtamalizadas de maíz

2.4.5 Caracterización fisicoquímica de las harinas nixtamalizadas de maíz

Las propiedades fisicoquímicas de las harinas nixtamalizadas obtenidas a partir de maíces criollos azul, blanco y rojo se presentan en la Tabla 4. La actividad de agua (A_w) mostró valores bajos en todas las harinas evaluadas, con registros de 0.325 para la harina azul, 0.263 para la blanca y 0.269 para la roja. Estos valores se sitúan por debajo del umbral crítico de 0.60, a partir del cual se favorece el desarrollo microbiano, lo que indica una adecuada estabilidad microbiológica y oxidativa de las harinas durante el almacenamiento (Eskin y Robinson, 2000). En comparación con lo reportado por Temba et al. (2017), quienes observaron valores de A_w cercanos a 0.43 en harinas nixtamalizadas, los resultados obtenidos sugieren una ventaja potencial en términos de vida útil y conservación de productos elaborados a partir de estas harinas.

El pH de las harinas nixtamalizadas presentó valores alcalinos, con un intervalo entre 8.72 y 9.45, comportamiento esperado como consecuencia del tratamiento con hidróxido de calcio. Estos resultados concuerdan con rangos previamente reportados para harinas nixtamalizadas, que suelen oscilar entre 8.6 y 11.2, dependiendo de la concentración de cal y de las condiciones de lavado del nixtamal (López-Espíndola et al., 2020). La alcalinidad residual desempeña un papel relevante en la funcionalidad tecnológica de la masa, al favorecer la gelatinización parcial del almidón y la cohesión de la matriz, además de

contribuir a la estabilidad microbiológica del producto. No obstante, se ha señalado que un exceso de lavado puede reducir el contenido de calcio residual y, con ello, modificar el pH final de la harina, por lo que su control resulta determinante para asegurar la calidad del producto (Zazueta et al., 2002).

El análisis de color mediante el sistema CIE Lab* evidenció cambios notorios en las harinas nixtamalizadas en comparación con los granos originales. En general, se observó una disminución de la luminosidad (L^*), lo que indica un oscurecimiento asociado al tratamiento térmico y alcalino, siendo este efecto más marcado en la harina de maíz rojo. En el parámetro a^* , la harina de maíz azul presentó un desplazamiento hacia valores negativos, en contraste con el valor ligeramente positivo observado en el grano, mientras que las harinas blanca y roja mantuvieron valores positivos. En cuanto al parámetro b^* , la harina azul mostró una reducción de la tonalidad amarilla, mientras que en las harinas blanca y roja se registró un incremento moderado.

Estas variaciones cromáticas han sido ampliamente asociadas a la modificación de los pigmentos naturales del maíz durante la nixtamalización, particularmente a cambios en la estabilidad y forma química de antocianinas y carotenoides bajo condiciones de pH alcalino y temperatura elevada (Salinas-Moreno et al., 2012). Además de modificar la apariencia visual, estos cambios pueden influir en la aceptabilidad sensorial y en la percepción de calidad de los productos finales elaborados a partir de estas harinas.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas de las harinas nixtamalizadas de maíces criollos.

Parámetro		HNM Azul	HNM Blanco	HNM Rojo
pH		8.72 ± 0.02^b	9.13 ± 0.13^a	9.45 ± 0.09^a
Humedad (%)		7.35 ± 0.6^a	6.37 ± 0.2^b	6.2 ± 0.5^b
Aw		0.325 ± 0.006^a	0.263 ± 0.005^b	0.269 ± 0.001^b
Color	L	36.8 ± 1.2^c	45.9 ± 2.7^a	33.0 ± 0.9^b
	a	-3.1 ± 0.7^b	3.4 ± 0.7^a	3.4 ± 0.5^a
	b	0.7 ± 0.2^b	9.0 ± 0.6^a	9.0 ± 0.7^a

Valor medio calculado a partir de tres réplicas $\pm$ desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

2.4.6 Análisis bromatológico de las harinas nixtamalizadas de maíz

La composición bromatológica de las harinas nixtamalizadas obtenidas a partir de maíces criollos azul, blanco y rojo se encontró dentro de los parámetros establecidos por la norma NMX-F-046-SCFI-2018, la cual establece como referencia un contenido mínimo de proteína de 7 %, un máximo de 3.5 % de ceniza y un mínimo de 2.5 % de extracto etéreo. En este estudio, el contenido de proteína osciló entre 7.86 y 8.05 %, confirmando valores superiores al mínimo normativo y comparables con los reportados para harinas de maíz nixtamalizado de uso industrial, donde se han documentado intervalos de 6.68–8.11 % (Bressani et al., 2001) y de 9.2–10.49 % (Flores et al., 2002).

La disminución del contenido proteico observada en las harinas con respecto a los granos originales concuerda con lo descrito para el proceso de nixtamalización tradicional, donde se ha reportado la pérdida de fracciones proteicas solubles, principalmente hacia el nejayote durante las etapas de cocción y lavado alcalino (Figueroa et al., 2001; Muñoz-Hernández et al., 1999, citados en Gaytán-Martínez et al., 2012). A pesar de estas pérdidas, los valores obtenidos evidencian que las harinas elaboradas a partir de maíces criollos pigmentados mantienen un contenido proteico competitivo frente a productos comerciales, lo que refuerza su potencial para aplicaciones alimentarias con enfoque nutrimental y funcional.

El contenido de cenizas de las harinas se mantuvo dentro del límite máximo permitido por la normativa, con valores comprendidos entre 1.23 y 1.49 %, lo que indica un contenido mineral adecuado y consistente con procesos de lavado controlados del nixtamal. Por su parte, el extracto etéreo presentó valores de 4.65 a 5.77 %, superando ampliamente el mínimo normativo. Estos resultados reflejan la conservación parcial de la fracción lipídica del grano, asociada principalmente al germen, y concuerdan con reportes previos para harinas nixtamalizadas obtenidas a partir de maíces criollos (Serna-Saldívar, 2015).

En relación con la fibra dietética, los valores totales oscilaron entre 7.86 y 9.05 %, rangos acordes con los reportados para productos derivados de maíces criollos nixtamalizados (Salinas-Moreno et al., 2013; Ortiz-Prudencio, 2006). En todas las harinas evaluadas predominó la fracción insoluble, con valores de 6.77 a 7.94 %, mientras que la fracción soluble se mantuvo baja y relativamente constante (1.09–1.11 %), comportamiento característico de la nixtamalización tradicional (Serna-Saldívar, 2015). El contenido de carbohidratos totales, que varió entre 75.98 y 77.57 %, refleja el incremento relativo esperado tras la eliminación parcial del pericarpio y del germen durante el tratamiento alcalino, fenómeno que ha sido descrito previamente para harinas nixtamalizadas (Gogoi et al., 2023).

Tabla 5. Análisis bromatológico de harinas nixtamalizadas de maíz

Parámetro	HNM Azul	HNM Blanco	HNM Rojo
Ceniza	1.33 ± 0.10 ^b	1.49 ± 0.02 ^a	1.23 ± 0.08 ^b
Proteína	10.05 ± 0.30 ^a	9.73 ± 0.03 ^b	8.41 ± 0.78 ^a
Lípidos	5.21 ± 0.09 ^a	4.65 ± 0.28 ^b	5.77 ± 0.08 ^a

Fibra soluble	1.09 ± 0.3 ^a	1.10 ± 0.01 ^a	1.11 ± 0.5 ^a
Fibra insoluble	6.77 ± 0.08 ^b	7.33 ± 1.5 ^a	7.94 ± 0.71 ^a
Carbohidratos	77.55 ± 0.6 ^a	77.57 ± 0.5 ^a	75.98 ± 0.3 ^b

Valor medio calculado a partir de tres réplicas ± desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

2.4.7 Perfil de aminoácidos de los granos de maíz y harinas nixtamalizadas

El análisis del perfil de aminoácidos de los granos de maíz criollo confirmó el patrón característico descrito para esta especie, en el que lisina y triptófano se identifican como los principales aminoácidos limitantes de la proteína del maíz (NRC, 1988; CIMMYT, 2010). En las tres variedades evaluadas, leucina, ácido glutámico y alanina fueron los aminoácidos de mayor concentración, mientras que lisina y triptófano presentaron los valores más bajos (Tabla 6). No obstante, se observaron diferencias entre variedades, destacando el maíz azul por presentar concentraciones ligeramente superiores de lisina (0.253 g/100 g) y triptófano (0.049 g/100 g) en comparación con el maíz blanco y rojo. Asimismo, el contenido de histidina fue notablemente mayor en el maíz azul, lo que resulta relevante desde el punto de vista nutricional, ya que este aminoácido es esencial durante etapas de crecimiento y participa en diversos procesos metabólicos.

La variabilidad observada en el perfil de aminoácidos entre las variedades analizadas concuerda con lo reportado para maíces criollos, donde factores genéticos, ambientales y de manejo agronómico influyen de manera significativa en la composición proteica del grano (Chávez-Servia et al., 2021). En este contexto, los resultados sugieren que ciertas variedades de maíz pigmentado, particularmente el maíz azul, pueden ofrecer un perfil proteico relativamente mejorado, complementando su reconocido contenido de compuestos bioactivos. En términos globales, la proporción de aminoácidos esenciales respecto a los aminoácidos totales fue cercana al 35 %, mientras que la relación aminoácidos esenciales/aminoácidos no esenciales se aproximó al 53 %, valores consistentes con los reportados para maíces criollos destinados al consumo humano.

La nixtamalización indujo modificaciones en el perfil de aminoácidos de las harinas en comparación con los granos crudos (Tabla 7), efecto que ha sido ampliamente documentado para este proceso tradicional. En particular, se observó una reducción en el contenido de lisina en las harinas nixtamalizadas, lo cual ha sido atribuido a reacciones de Maillard y a la interacción de este aminoácido con compuestos formados durante la cocción alcalina, disminuyendo su contenido total y potencialmente su disponibilidad (Paredes-López et al., 2009). A pesar de esta disminución, la harina nixtamalizada de maíz azul mantuvo el mayor contenido de lisina entre las variedades evaluadas, seguida de la blanca y la roja, lo que sugiere una mayor retención relativa de este aminoácido esencial en la variedad azul tras el procesamiento.

En el caso del triptófano, los cambios inducidos por la nixtamalización fueron menos consistentes entre variedades. Aunque algunos estudios han reportado ligeras disminuciones en su contenido total, también se ha señalado que el tratamiento alcalino puede mejorar su biodisponibilidad (Serna-Saldívar et al., 1990). En este estudio, la harina nixtamalizada de maíz rojo presentó un contenido ligeramente superior de triptófano en comparación con las harinas azul y blanca, lo que podría estar relacionado con diferencias en la estabilidad de este aminoácido o con su liberación a partir de la matriz proteica durante el procesamiento. Un aspecto relevante fue el mantenimiento de un contenido elevado de histidina en la harina nixtamalizada de maíz azul, en concordancia con lo observado en el grano crudo, lo que refuerza el potencial nutricional de esta variedad. Adicionalmente, se observó un incremento en el contenido de metionina en las harinas nixtamalizadas respecto a los granos originales, particularmente en la harina de maíz azul. Este comportamiento, poco documentado en la literatura, sugiere posibles cambios en la accesibilidad o concentración relativa de aminoácidos sulfurados tras la nixtamalización y resalta la necesidad de estudios adicionales que permitan esclarecer la interacción entre el tratamiento alcalino y la matriz proteica de los maíces criollos.

Estos resultados evidencian que la nixtamalización modifica el perfil de aminoácidos del maíz, con efectos diferenciados según la variedad, y que la harina nixtamalizada de maíz azul conserva un balance de aminoácidos esenciales relativamente más favorable en comparación con las variedades blanca y roja, lo cual resulta relevante para su aprovechamiento en el desarrollo posterior de productos fortificados.

Tabla 6. Perfil de aminoácidos de maíces criollos azul, blanco y rojo

Aminoácido (AA)	Aminoácido (mg AA / g de proteína)			
	Maíz Blanco	Maíz Azul	Maíz Rojo	FAO & IAEA (2024)
Histidina	57.28	32.35	34.81	15
Isoleucina	30.99	32.35	32.68	30
Leucina	108.06	113.95	113.30	59
Lisina	41.05	38.47	40.72	45
Metionina+ cistina	34.24	28.81	31.36	22
Fenilalanina + tirosina	68.80	74.68	75.04	38
Treonina	37.16	38.15	38.59	23
Triptófano	7.95	6.60	5.91	6
Valina	46.41	48.45	48.60	30
Alanina	72.04	75.97	77.01	-
Arginina	47.70	50.06	52.38	-
Ácido aspártico	68.47	70.66	71.10	-
Glicina	42.19	43.94	44.83	-
Ácido glutámico	196.33	203.77	203.45	-
Serina	50.30	52.63	53.04	-
Prolina	65.88	61.32	50.41	-
Hidroxiprolina	25.15	27.84	26.77	-

Tabla 7. Perfil de aminoácidos de harinas nixtamalizadas de maíces azul, blanco y rojo.

Aminoácido (AA)	Aminoácido (mg AA / g de proteína)			
	HNM Blanco	HNM Azul	HNM Rojo	FAO & IAEA (2024)
Histidina	31.33	47.93	29.64	15
Isoleucina	33.33	31.71	32.98	30
Leucina	135.03	125.25	130.70	59
Lisina	30.40	31.57	24.92	45
Metionina + cistina	34.72	37.36	32.07	22
Fenilalanina + tirosina	80.09	79.06	77.66	38
Treonina	36.57	37.50	35.71	23

Triptófano	5.56	5.36	6.38	6
Valina	47.38	45.47	45.74	30
Alanina	82.25	75.59	79.48	-
Arginina	42.28	40.11	39.67	-
Ácido aspártico	66.20	62.84	63.22	-
Glicina	38.43	36.49	37.69	-
Ácido glutámico	193.83	174.34	219.15	-
Serina	54.94	52.42	53.19	-
Prolina	56.94	75.59	63.07	-
Hidroxiprolina	30.71	41.41	28.72	-

2.4.8 Análisis polifenólico y capacidad antioxidante en granos de maíz y harinas nixtamalizadas

El contenido de compuestos fenólicos totales en los granos de maíz mostró diferencias claras entre variedades, con valores de 58.72 ± 5.08 mg EAG/100 g para el maíz azul, 48.68 ± 2.1 mg EAG/100 g para el blanco y 62.76 ± 0.6 mg EAG/100 g para el rojo (Tabla 8). Estos resultados confirman que los maíces pigmentados concentran mayores niveles de fenoles en comparación con el maíz blanco, lo cual se asocia a la presencia de antocianinas y otros polifenoles localizados principalmente en el pericarpio y la capa de aleurona (Santiago-Ramos et al., 2018). Este comportamiento ha sido ampliamente documentado para maíces criollos, los cuales suelen presentar concentraciones superiores de metabolitos secundarios frente a variedades híbridas o comerciales (Pérez-Terrazas et al., 2019).

Aunque los valores obtenidos se sitúan dentro del rango reportado para maíces nativos, se encuentran en la parte baja de los intervalos descritos para variedades pigmentadas, donde se han reportado concentraciones de hasta 213 mg EAG/100 g en maíz azul y 166 mg EAG/100 g en maíz rojo (López-Martínez et al., 2011; Salinas-Moreno et al., 2019). Esta variabilidad puede atribuirse a factores genéticos, ambientales y agronómicos, así como a diferencias en los métodos de extracción y cuantificación, incluyendo el tipo de solvente, la relación sólido-líquido y el grado de molienda del grano (Santiago-Ramos et al., 2018; Pérez-Terrazas et al., 2019).

En cuanto a flavonoides totales, los valores determinados fueron de 34.55 ± 2.0 mg EQ/100 g para el maíz azul, 29.15 ± 1.8 mg EQ/100 g para el blanco y 32.49 ± 0.4 mg EQ/100 g para el rojo, superando los rangos comúnmente reportados para maíces pigmentados y no pigmentados (Serna-Saldívar, 2015). Este comportamiento puede explicarse, en parte, por la naturaleza del método espectrofotométrico empleado, el cual puede detectar simultáneamente flavonoides no antociánicos y antocianinas debido a la formación de complejos con $AlCl_3$, lo que ha sido señalado previamente como una posible fuente de sobreestimación relativa (López-Martínez et al., 2011).

Las antocianinas fueron detectadas exclusivamente en los maíces pigmentados, con valores de 415.32 ± 0.04 mg y 408.49 ± 0.08 mg equivalentes de cianidina-3-glucósido/100 g para los maíces azul y rojo, respectivamente, mientras que no se detectaron en el maíz blanco. Estos valores se ubican en el rango alto reportado para maíces criollos pigmentados (200–400 mg/100 g) y confirman la elevada capacidad antioxidante asociada a estas variedades, particularmente cuando los pigmentos se distribuyen tanto en pericarpio como en aleurona (Salinas-Moreno et al., 2019; Santiago-Ramos et al., 2018).

La capacidad antioxidante evaluada mediante los radicales ABTS^{•+} y DPPH[•] reflejó el mismo patrón observado en el contenido de compuestos fenólicos. Los valores de IC₅₀ ABTS^{•+} oscilaron entre 212.54 y 237.04 µg/mL, mientras que para DPPH[•] se ubicaron entre 502.47 y 515.91 µg/mL (Tabla 8), rangos consistentes con los reportados para maíces pigmentados y no pigmentados (López-Martínez et al., 2009; Žilić et al., 2012). Los maíces azul y rojo mostraron mayor actividad antioxidante frente a ambos radicales, atribuible a su mayor concentración de antocianinas, flavonoides y fenoles libres, mientras que la actividad observada en el maíz blanco se asocia principalmente a ácidos fenólicos como el ácido ferúlico, predominante en granos no pigmentados (Mora-Rochín et al., 2010).

Tabla 8. Determinación de ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante en granos de maíz.

Parámetro	Maíz azul	Maíz blanco	Maíz rojo
Fenoles	58.72 ± 5.08^b	48.68 ± 2.1^c	62.76 ± 0.6^a
Flavonoides	34.55 ± 2.0^a	29.15 ± 1.8^b	32.49 ± 0.4^a
Antocianinas	415.32 ± 0.04^a	ND	408.49 ± 0.08^a
ABTS •+ (IC50)	212.54 ± 1.1^a	237.04 ± 3.0^b	216.10 ± 0.98^a
DPPH• (IC50)	502.47 ± 0.04^a	515.91 ± 0.20^b	502.81 ± 1.2^a

Valor medio calculado a partir de tres réplicas $\pm$ desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$). ND= No detectado. El contenido de los compuestos fenólicos esta expresado en mg equivalentes de ácido gálico en 100 g. El contenido de flavonoides esta expresado en mg equivalentes de quercetina en 100 g. El contenido de antocianinas esta expresado en mg equivalentes de cianidina-3-glucósido en 100 g. La concentración media efectiva esta expresada en µg/mL.

En las harinas nixtamalizadas se observó una reducción general del contenido de compuestos fenólicos respecto a los granos crudos. Los valores de fenoles totales fueron de 45.72 ± 0.23 mg EAG/100 g para HNM azul, 37.50 ± 1.5 mg EAG/100 g para HNM blanco y 41.75 ± 0.9 mg EAG/100 g para HNM rojo (Tabla 9). Esta disminución concuerda con lo documentado para la nixtamalización, donde la cocción alcalina y el lavado del nixtamal

favorecen la solubilización y eliminación de compuestos fenólicos en el nejayote, con pérdidas reportadas de hasta 40 % (López-Martínez et al., 2011; Santiago-Ramos et al., 2018). A pesar de ello, los valores se mantienen dentro de los rangos descritos para harinas nixtamalizadas de maíces criollos pigmentados (Salinas-Moreno et al., 2019).

Los flavonoides totales en las harinas nixtamalizadas también disminuyeron en comparación con los granos, con valores de 21.53–29.47 mg EQ/100 g, lo cual se atribuye a la sensibilidad de estas estructuras a condiciones alcalinas y térmicas. No obstante, se ha señalado que la nixtamalización puede favorecer la liberación de flavonoides previamente ligados a la matriz polisacáridica, compensando parcialmente las pérdidas iniciales (Serna-Saldívar, 2015; López-Martínez et al., 2011). En relación con las antocianinas, las harinas nixtamalizadas de maíz azul y rojo conservaron concentraciones elevadas (344.25 ± 0.07 y 333.92 ± 0.04 mg/100 g, respectivamente), a pesar de que se han reportado pérdidas de hasta 60 % durante el procesamiento. Esta retención parcial se ha atribuido a la protección que confiere la matriz del almidón y las proteínas del endospermo, así como a la estabilidad diferencial de ciertos glucósidos antociánicos frente a condiciones alcalinas (Santiago-Ramos et al., 2018; López-Martínez et al., 2011).

La capacidad antioxidante de las harinas nixtamalizadas mostró valores de IC_{50} ABTS $\bullet^+$ entre 285.49 y 295.99 μ g/mL y de IC_{50} DPPH $\bullet$ entre 746.21 y 790.62 μ g/mL (Tabla 9), evidenciando una reducción moderada respecto a los granos crudos. Estos resultados coinciden con los rangos reportados para harinas nixtamalizadas de maíces pigmentados y reflejan la conservación de una fracción significativa de compuestos bioactivos tras el tratamiento alcalino (Žilić et al., 2012; Salinas-Moreno et al., 2019). La ligera ventaja observada en las harinas pigmentadas frente a la blanca confirma la contribución residual de antocianinas y flavonoides a la actividad antioxidante global, aun después del procesamiento térmico.

Tabla 9. Determinación de ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante en harinas nixtamalizadas de maíz (HMN).

Parámetro	HNM Azul	HNM Blanco	HNM Rojo
Fenoles	45.72 ± 0.23^a	37.50 ± 1.5^c	41.75 ± 0.9^b
Flavonoides	29.47 ± 0.99^a	21.53 ± 0.61^b	29.08 ± 0.01^a
Antocianinas	344.25 ± 0.07^a	ND	333.92 ± 0.04^b
ABTS $\bullet^+$ (IC₅₀)	285.49 ± 0.51^c	295.99 ± 0.09^a	289.59 ± 2.3^b
DPPH$\bullet$ (CIC₅₀)	746.21 ± 1.0^c	790.62 ± 0.5^a	774.24 ± 1.4^b

Valor medio calculado a partir de tres réplicas $\pm$ desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$). ND= No detectado. El contenido de los compuestos fenólicos esta expresado en mg equivalentes de ácido gálico en 100 g. El contenido de flavonoides esta expresado en mg equivalentes de quercetina en 100 g. El contenido de antocianinas esta expresado en mg equivalentes de cianidina-3-glucósido en 100 g. La concentración media efectiva esta expresada en μ g de extracto mL.

2.5 Conclusiones capítulo II

Los maíces criollos azul, blanco y rojo de la Meseta Purépecha mostraron una calidad física y nutricional adecuada para su aprovechamiento tecnológico, con diferencias atribuibles a su diversidad genética y a la presencia de pigmentos naturales. Las variedades pigmentadas destacaron por su mayor contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante, asociadas principalmente a la presencia de antocianinas y otros polifenoles localizados en el pericarpio y la capa de aleurona, lo que refuerza su interés desde una perspectiva nutracéutica.

Desde el punto de vista bromatológico, los maíces criollos presentaron contenidos relevantes de proteína, fibra dietética y lípidos, comparables o superiores a los reportados para variedades comerciales. Aunque el perfil de aminoácidos confirmó las deficiencias características del maíz en lisina y triptófano, las variedades pigmentadas, particularmente el maíz azul, mostraron concentraciones ligeramente superiores de algunos aminoácidos esenciales, lo que sugiere un potencial nutricional diferenciado que podría ser aprovechado mediante estrategias de formulación y complementación. El proceso de nixtamalización indujo modificaciones esperadas en la composición de las harinas, incluyendo una reducción moderada del contenido proteico y de compuestos fenólicos, atribuible a pérdidas durante la cocción alcalina y el lavado del nixtamal. No obstante, las harinas nixtamalizadas de maíces pigmentados conservaron fracciones importantes de fibra dietética, aminoácidos esenciales y compuestos antioxidantes, manteniendo una actividad antioxidante significativa frente a los radicales ABTS $\bullet^+$ y DPPH $\bullet$. Esta retención parcial de compuestos bioactivos confirma que, aun tras el procesamiento, las harinas pigmentadas conservan un perfil funcional relevante.

Los resultados de este capítulo evidencian que los maíces criollos pigmentados y sus harinas nixtamalizadas constituyen una base nutricional y funcional sólida para el desarrollo de productos derivados con valor agregado. Al mismo tiempo, las limitaciones nutricionales propias del maíz y las pérdidas asociadas al procesamiento justifican la exploración de estrategias de fortificación orientadas a mejorar la calidad proteica y el potencial antioxidante del producto final, aspectos que se abordan en el desarrollo y caracterización de tortillas funcionales presentados en el Capítulo 3.

2.6 Literatura citada

AACC. (2000). Approved methods of analysis (10th ed.). American Association of Cereal Chemists.

Aguayo-Rojas, J., Mora-Rochín, S., Cuevas-Rodríguez, E.O., Serna-Saldivar, S.O., Gutierrez-Urbe, J.A., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J. (2012). Phytochemicals and antioxidant capacity of tortillas obtained after lime-cooking extrusion process of whole pigmented Mexican maize. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(2), 178-185.

Arámbula-Villa, G., Martínez-Bustos, F., Figueroa-Cárdenas, J. D., & Ordorica-Falomir, C. (2001).

Physicochemical, structural and textural properties of tortillas from extruded instant corn flour. *Journal of Cereal Science*, 33(1), 31–40.

Bressani, R., Turcios, J. C., de Ruiz, A. S., & de Palomo, P. P. (2001). Effect of processing conditions on the nutritive value of maize. *Food Reviews International*, 17(4), 409–429.

Bressani, R. (2008). Maize and maize products in human nutrition. *FAO Food and Nutrition Series No. 25*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Chávez-Servia, J. L., Vera-Guzmán, A. M., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Hernández-López, D. (2021). Comparative Study of Proximate Composition, Phenolic Compounds, and Antioxidant Capacity in Four Maize (*Zea mays* L.) Genotypes Cultivated under Agroecological and Conventional Systems. *International Agrophysics*, 35(3), 329–338.

CIMMYT. (2010). Maize—Global alliance for improving food security and livelihoods. International Maize and Wheat Improvement Center.

Domínguez Escorcía, E., Bernal Muñoz, R., Hernández Díaz, R., López Mejía, O.A., Macías García, J.L., Rodríguez Castañeda, E.L., Peña Escalona, F.L. (2024). Componentes morfológicos, contenido nutricional y de antocianinas en forraje verde hidropónico de maíces criollos de color. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 4(2). <https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2024.04.10>

de la Parra, C., Serna-Saldivar, S. O., & Liu, R. H. (2007). Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn for production of masa, tortillas, and tortilla chips. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(10), 4177–4183.

Eskin, N. A. M., & Robinson, D. S. (2000). Food shelf life stability: Chemical, biochemical and microbiological changes. CRC Press

Flores, R. A., Martínez-Bustos, F., & Figueroa, J. D. C. (2002). Physicochemical and nutritional changes during nixtamalization and tortilla production. *Journal of Cereal Science*, 36(1), 57–66.

Gaytán-Martínez, M., et al. (2012). Effect of nixtamalization on the physicochemical and nutritional properties of maize flours. *Food Chemistry*, 134(1), 193–199.

Gogoi, N., et al. (2023). Dietary fiber composition of maize-based foods and its nutritional implications. *Journal of Cereal Science*, 109, 103601. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103601>

Liu, R. H., et al. (2002). Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: mechanism of action. *The Journal of Nutrition*, 132(11), 3479S–3485S.

- López-Espíndola, D., et al. (2020). Antioxidant and nutritional properties of pigmented maize flour in nixtamalization. *Food Chemistry*, 305, 125427. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125427.
- López-Martínez, L. X., Oliart-Ros, R. M., Valerio-Alfaro, G., Lee, C. H., Parkin, K. L., & García, H. S. (2009). Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *LWT – Food Science and Technology*, 42(6), 1187–1192.
- López-Martínez, L. X., Parkin, K. L., & García, H. S. (2011). Phase II-inducing, polyphenols content and antioxidant capacity of corn from phenotypes of different colors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(16), 8521–8529.
- Makkar, H. P. S., et al. (1993). Measurement of total phenolics and tannins using Folin–Ciocalteu method. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 61, 161–165.
- Maldonado-Astudillo, Y. I., Gutiérrez González, A. A., Flores Rogel, Y. L., Arámbula-Villa, G., Flores-Casamayor, V., Jiménez-Hernández, J., Ramírez, M., Álvarez-Fitz, P., & Salazar, R. (2021). Propiedades morfológicas, fisicoquímicas y actividad antiproliferativa de maíces pigmentados de Guerrero. *Nova Scientia*, 13(27), 00010. Epub 21 de febrero de 2022. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2825>
- Martínez-Bustos, F., et al. (2001). Effect of lime concentration and cooking time on the quality of nixtamalized corn flour. *Cereal Chemistry*, 78(3), 300–305.
- Martínez-Flores, H. E., Garnica-Romo, M. G., & Paredes-López, O. (2016). Nutritional quality of maize landraces from central Mexico. *Food Chemistry*, 210, 478–484.
- Mora-Rochín, S., et al. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of tortillas from pigmented maize processed by conventional nixtamalization. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 502–508.
- NMX-FF-034/2-SCFI-2003. Productos alimenticios de Maíz para nixtamalización—Especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-F-046-SCFI-2018. (2018). Industria alimentaria—Harina de maíz nixtamalizado—Especificaciones. Secretaría de Economía, Dirección General de Normas, México.
- NOM-247-SSA1-2008. Productos y servicios. Cereales y sus productos. Disposiciones sanitarias y especificaciones nutrimentales.
- NRC. (1988). Nutrient requirements of laboratory animals (4th ed.). National Academy Press.
- Ortiz-Prudencio, C. (2006). Contenido de fibra dietética en harinas nixtamalizadas de maíz blanco y azul (*Zea mays* L.). Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH).
- Padilla, E., Guzmán, C., & Paredes-López, O. (2017). Maize carotenoids and lipophilic antioxidants in pigmented varieties. *Journal of Cereal Science*, 74, 109–116.
- Palacios-Fonseca, A. J., et al. (2009). Physicochemical, structural and nutritional properties of nixtamalized maize flour. *Food Chemistry*, 115(2), 649–656.

Paredes-López, O., Bello-Pérez, L. A., & López, M. G. (2009). *Corn: Chemistry and Technology* (2nd ed.). AACCC International Press.

Pérez-Terrazas, S., Astier, M., & Merlín-Urbe, Y. (2019). Agrobiodiversity conservation through traditional maize systems in Michoacán. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 43(7–8), 894–915.

Randhir, R., & Shetty, K. (2007). Mung bean processing for value-added products with enhanced phenolic content and health benefits. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(4), 581–589.

Re, R., et al. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine*, 26(9–10), 1231–1237.

Salinas-Moreno, Y., Aguilar-Modesto, L. (2010). Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays* L.) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 2(1), 5–11.

Salinas-Moreno, Y., et al. (2012). Anthocyanins and antioxidant activity in maize grains. *Food Science and Technology International*, 18(6), 537–545.

Salinas-Moreno, Y., Sánchez, J. J., Aguilar-Rangel, M. R., & Velázquez-Cardelas, G. A. (2013). Contenido de fibra dietética, soluble e insoluble, en razas mexicanas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 7–15.
<https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/36-1/2a.pdf>

Serna-Saldívar, S. O. (2010). *Cereal grains: properties, processing, and nutritional attributes*. CRC Press.

Serna-Saldívar, S. O., Rooney, L. W., & Waniska, R. D. (1990). Changes in the nutritional and functional properties of maize during nixtamalization and tortilla production. *Cereal Foods World*, 35(6), 523–529.

Randhir, R., & Shetty, K. (2007). Improved alpha-amylase and alpha-glucosidase inhibitory activities in fenugreek sprouts. *Journal of Food Biochemistry*, 31(4), 449–470.

Temba, M. C., Njobeh, P. B., Adebo, O. A., Olugbile, A. O., & Kayitesi, E. (2017). The role of compositional and processing factors on the bioaccessibility of phenolic compounds in maize. *Food Research International*, 100, 176–186.

Treviño, M. B., Rodríguez, R., & Salinas, Y. (2017). Antioxidant capacity and phenolic content of traditional Mexican foods. *Food Chemistry*, 217, 499–507.

Zavala, F. A. (2015). Efecto del proceso de nixtamalización por infrarrojo sobre el contenido de aflatoxinas en las tortillas de maíz. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 1–77.

Zazueta, C., Martínez-Bustos, F., & Figueroa, J. D. C. (2002). Physical and chemical changes in maize during nixtamalization and tortilla production. *Cereal Chemistry*, 79(3), 379–384.

Žilić, S., et al. (2012). Phenolic compounds and antioxidant activity of colored maize kernels. *Journal of Cereal Science*, 56(3), 468–477.

Capítulo III: Desarrollo y caracterización de tortillas funcionales con *Moringa oleifera*

3.1 Resumen

En este capítulo se desarrollaron tortillas de maíz criollo elaboradas a partir de harinas nixtamalizadas, incorporando harina de hoja y concentrado proteico de *Moringa oleifera*, con el propósito de mejorar su calidad nutricional y funcional. El objetivo fue formular y evaluar tortillas fortificadas en términos de composición nutrimental, perfil de aminoácidos, contenido de compuestos bioactivos, capacidad antioxidante y propiedades tecnológicas. Se elaboraron tortillas control y formulaciones enriquecidas con harina y concentrado proteico de moringa. Se determinó su composición proximal mediante métodos AOAC, perfil de aminoácidos por cromatografía, contenido de compuestos fenólicos y flavonoides totales, y actividad antioxidante mediante los ensayos ABTS^{•+} y DPPH[•]. Asimismo, se evaluaron parámetros tecnológicos como rendimiento, textura y características físicas del producto final. La adición de moringa incrementó significativamente ($p < 0.05$) el contenido de proteína y fibra dietética en las tortillas enriquecidas, alcanzando valores de proteína superiores a las formulaciones control. En términos de perfil aminoacídico, se observaron incrementos relevantes en lisina y triptófano, particularmente en las formulaciones con concentrado proteico. Asimismo, las tortillas fortificadas presentaron mayores concentraciones de compuestos fenólicos y flavonoides, reflejándose en una mayor capacidad antioxidante frente a los radicales ABTS^{•+} y DPPH[•]. A pesar de estas modificaciones, las propiedades tecnológicas se mantuvieron dentro de rangos adecuados para su procesamiento y consumo.

3.2 Introducción

La tortilla de maíz representa uno de los alimentos más emblemáticos y de mayor consumo en México y otras regiones de Mesoamérica, constituyendo una fuente primaria de energía, carbohidratos complejos, calcio y fibra dietética para millones de personas. Su relevancia nutricional y cultural se mantiene particularmente en comunidades rurales, donde puede aportar hasta el 50–70 % de la ingesta diaria de energía (Serna-Saldívar, 2015). No obstante, a pesar de su importancia en la dieta cotidiana, la tortilla presenta limitaciones nutricionales asociadas a la calidad de su fracción proteica, derivadas principalmente del bajo contenido de aminoácidos esenciales como lisina y triptófano, lo que reduce su valor biológico cuando se consume como fuente principal de proteína (Hernández-Uribe et al., 2020).

Diversas investigaciones han documentado que la nixtamalización mejora significativamente la biodisponibilidad de nutrientes como calcio y niacina, además de inducir cambios estructurales en la matriz del almidón y de la proteína que favorecen la digestibilidad. Sin embargo, este proceso no corrige de manera sustancial la deficiencia de aminoácidos esenciales inherente al grano de maíz, por lo que la tortilla continúa siendo un alimento energéticamente denso pero limitado desde el punto de vista proteico (Serna-Saldívar et al., 2015). Esta condición ha motivado el desarrollo de estrategias de fortificación nutricional orientadas a mejorar su perfil proteico y funcional sin comprometer sus propiedades tecnológicas ni su aceptación por parte del consumidor. La tortilla de maíz ha sido propuesta como una matriz idónea para la incorporación de ingredientes funcionales,

debido a su alto consumo per cápita, su bajo costo y su papel central en la dieta. Estudios previos han evaluado la adición de ingredientes como leguminosas, semillas, algas y vegetales ricos en fibra o proteína, reportando incrementos en el contenido proteico y antioxidante. No obstante, en muchos casos, estos enriquecimientos se acompañan de efectos adversos sobre parámetros tecnológicos clave, como la capacidad de inflado, la textura, la rolabilidad o el color, lo que limita su viabilidad a escala doméstica o industrial (Sánchez-Marroquín et al., 2021; Cuevas-Martínez et al., 2010).

Las hojas de *Moringa oleifera* han despertado un interés creciente como ingrediente funcional debido a su elevada concentración de proteínas, fibra dietética, minerales y compuestos fenólicos con actividad antioxidante. A diferencia de otras fuentes vegetales, la moringa presenta un perfil aminoacídico más equilibrado, con aportes relevantes de lisina, leucina e isoleucina, lo que la convierte en un candidato atractivo para complementar la fracción proteica del maíz (Fahey, 2005; Gopalakrishnan et al., 2016). Asimismo, múltiples estudios han documentado su capacidad antioxidante y sus efectos hipoglucemiantes, hipolipemiantes y antiinflamatorios en modelos experimentales, lo que respalda su potencial como ingrediente funcional en el desarrollo de alimentos orientados a la prevención de enfermedades metabólicas (Mabrouki et al., 2020; Alkhudhayri et al., 2021).

La incorporación de moringa en tortillas de maíz plantea, sin embargo, desafíos tecnológicos relevantes. La adición directa de harina de hoja puede modificar la estructura de la masa, alterar el color del producto final y afectar parámetros críticos de calidad, mientras que el uso de concentrados proteicos puede permitir una mejora más específica del contenido proteico con menor impacto sensorial. En este sentido, resulta necesario evaluar comparativamente el efecto de ambos enfoques de fortificación harina de hoja y concentrado proteico sobre la composición nutricional, la capacidad antioxidante y la calidad tecnológica de las tortillas. Con base en la caracterización fisicoquímica, bromatológica y antioxidante de los maíces criollos y de sus harinas nixtamalizadas presentada en el Capítulo 2, el presente capítulo se enfoca en el desarrollo de tortillas elaboradas a partir de maíces criollos pigmentados, adicionadas con harina de hoja de *Moringa oleifera* y con su concentrado proteico. Se analiza el impacto de estas formulaciones sobre el perfil nutricional, la retención de compuestos bioactivos y las propiedades tecnológicas de las tortillas, con el fin de establecer su viabilidad como alimentos funcionales y su potencial aplicación en estrategias de mejora de la calidad de la dieta.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Materiales

Se utilizaron harinas nixtamalizadas obtenidas a partir de maíces criollos azul, blanco y rojo previamente caracterizados (Capítulo 2). Las hojas de *Moringa oleifera* fueron colectadas en el municipio de Huetamo, Michoacán, deshidratadas a la sombra y molidas hasta obtener un tamaño de partícula menor a 250 μm . El concentrado proteico de moringa se obtuvo mediante extracción asistida por ultrasonido, siguiendo el procedimiento descrito previamente.

Todos los reactivos empleados para los análisis bromatológicos y antioxidantes fueron de grado analítico.

3.3.2 Obtención del concentrado proteico de hoja de *Moringa oleifera* (CPMO)

La extracción del concentrado proteico se realizó a partir de hoja de moringa deshidratada utilizando ultrasonido con sonda, empleando agua desionizada como solvente. Las muestras se mezclaron en una proporción 1:30 (p/v) y se sometieron a sonicación a una amplitud del 30 % durante 20 minutos. Posteriormente, la suspensión fue filtrada y las proteínas se precipitaron mediante ajuste alcalino, seguido de centrifugación a 4000 rpm durante 15 minutos. El precipitado recuperado se secó en horno a 50 °C hasta peso constante y se almacenó en recipientes herméticos para su posterior caracterización.



Figura 8. Concentrado proteico de *M. oleifera*

3.3.3 Formulación y elaboración de tortillas

La elaboración de las tortillas se realizó conforme al método descrito por Méndez-Albores et al. (2004), con ligeras adaptaciones. Las harinas nixtamalizadas se rehidrataron hasta alcanzar un contenido de humedad aproximado del 60 %. A partir de la masa obtenida, se elaboraron testales de 30 ± 1 g, los cuales se comprimieron mediante una tortilladora manual (González®) para obtener discos de 13.5 cm de diámetro y 1.2 mm de espesor.

Los discos se cocieron en un comal de hierro precalentado a una temperatura promedio de 180 °C, aplicando un tiempo de cocción de 17 s en la primera cara, 55 s en la segunda y 17 s finales tras el segundo volteo.

Se desarrollaron los siguientes tratamientos:

- **Tortilla control (TC):** elaborada exclusivamente con harina nixtamalizada de maíz criollo.

- **Tortilla con harina de moringa (THM):** harina nixtamalizada adicionada con 5 % de harina de hoja de *Moringa oleifera*.

- **Tortilla con concentrado proteico de moringa (TCM):** harina nixtamalizada adicionada con 5 % de concentrado proteico de *Moringa oleifera*.

Cada formulación se elaboró para las tres distintas variedades.

3.3.4 Obtención de extractos para la evaluación de la capacidad antioxidante

Los extractos se obtuvieron mediante extracción asistida por ultrasonido a partir de las muestras secas y molidas, empleando una relación sólido:solvente de 1:20 (p/v) con etanol al 30 % (v/v). La extracción se realizó durante 20 minutos, a una temperatura de 50 °C y 30 % de amplitud. Posteriormente, las suspensiones se centrifugaron y el sobrenadante se filtró al vacío para su uso en la determinación de compuestos fenólicos, flavonoides totales y capacidad antioxidante. Los extractos se mantuvieron protegidos de la luz y refrigerados hasta su análisis.

3.3.5 Análisis bromatológico de las tortillas, HMO y CPMO

Las tortillas obtenidas se sometieron a análisis bromatológico para la determinación de humedad, cenizas, proteína y extracto etéreo, siguiendo métodos oficiales de la AACC (2000). El contenido de carbohidratos totales se calculó por diferencia. La fibra dietética total se determinó mediante métodos gravimétricos enzimáticos, expresando los resultados en base seca.

3.3.6 Determinación de compuestos fenólicos y flavonoides totales

El contenido de compuestos fenólicos totales se determinó mediante el método colorimétrico de Folin–Ciocalteu, de acuerdo con lo descrito por Makkar et al. (1993), con modificaciones menores reportadas por Treviño et al. (2017). Para ello, se mezclaron 250 µL del extracto con 250 µL del reactivo Folin–Ciocalteu (2 N) y 250 µL de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 20%. La mezcla se agitó y se incubó a 40 °C durante 30 min. Posteriormente, se adicionaron 2 mL de agua destilada y se homogeneizó nuevamente. La absorbancia se midió a 750 nm empleando un espectrofotómetro (VELAB®, EUA). El contenido de fenólicos totales se cuantificó utilizando ácido gálico como estándar y los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra (mg EAG/g).

El contenido de flavonoides totales se evaluó siguiendo el método descrito por Liu et al. (2002). Se mezclaron 150 µL del extracto con 150 µL de NaNO_2 al 5% y se dejó reaccionar durante 5 min. Posteriormente, se añadieron 150 µL de AlCl_3 al 10% y 1 mL de NaOH 0.1 M, agitándose la mezcla hasta homogeneizar. La absorbancia se registró a 510 nm en un espectrofotómetro (VELAB®, EUA). La cuantificación se realizó utilizando quercetina como estándar y los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de quercetina por gramo de muestra (mg EQ/g).

3.3.7 Evaluación de la capacidad antioxidante

La actividad antioxidante se determinó mediante los ensayos de captura de radicales DPPH• y ABTS•+, utilizando métodos espectrofotométricos ampliamente reportados.

El ensayo de DPPH• se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito por Randhir y Shetty (2007), con modificaciones propuestas por Treviño et al. (2017). Se midió la absorbancia a 517 nm utilizando un espectrofotómetro (VELAB®, EUA). Los resultados se expresaron como concentración inhibitoria media (IC50) del radical DPPH•, calculado mediante la ecuación.

La actividad antioxidante mediante el radical ABTS•+ se determinó conforme al método descrito por Re et al. (1999). Para la generación del radical, se preparó una solución madre mezclando ABTS (7 mM) y persulfato de potasio (2.45 mM) en una proporción 2:1 (v/v), la cual se dejó reposar a temperatura ambiente durante 16 h en oscuridad. Posteriormente, la solución se diluyó con etanol hasta ajustar una absorbancia de 0.70 ± 0.02 a 734 nm. Se midió la absorbancia a 734 nm en un espectrofotómetro (VELAB®, EUA). Los resultados se expresaron como concentración inhibitoria media (IC50) del radical ABTS•+.

3.3.8 Evaluación de calidad tecnológica de las tortillas

La calidad tecnológica se evaluó mediante los siguientes parámetros:

- **Rolabilidad:** se determinó enrollando tortillas a 45 °C sobre un tubo de vidrio de 2 cm de diámetro y evaluando el grado de ruptura en una escala de 1 a 5 (Cuevas-Martínez et al., 2010).
- **Grado de inflado:** se evaluó visualmente durante la cocción y se clasificó en una escala de 1 a 3 según el porcentaje de inflado (Cuevas-Martínez et al., 2010).
- **Pérdida de peso en cocción:** se determinó por diferencia de peso antes y después de la cocción.
- **Textura:** se evaluó mediante pruebas de tensión y corte utilizando un analizador de textura CT3 (Brookfield®), siguiendo la metodología descrita por Arámbula-Villa et al. (2001).

3.3.9 Análisis estadístico

Los resultados se expresan como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey, utilizando un nivel de significancia de $p \leq 0.05$ para detectar diferencias significativas entre tratamientos. El análisis estadístico se realizó utilizando el software RStudio®.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Caracterización bromatológica de la harina y concentrado proteico de la hoja de *M. oleifera*

Los resultados obtenidos por Tranquilino-Rodriguez, et al (2025) (Tabla 10) para la hoja deshidratada de *Moringa oleifera* confirman su elevada densidad nutrimental y justifican su uso como ingrediente funcional. El contenido proteico determinado (29.38 ± 1.00 %) se ubica dentro del rango superior reportado para hojas de moringa, las cuales generalmente presentan valores entre 23 y 30 % en base seca, dependiendo del estado fisiológico de la planta, condiciones edafoclimáticas y método de secado (Makkar & Becker, 1996; Sánchez-Machado et al., 2010; Gopalakrishnan et al., 2016). Este nivel de proteína es considerablemente mayor al de la mayoría de vegetales de consumo habitual y explica el interés creciente de la moringa como fuente alternativa de proteína vegetal.

El alto contenido de cenizas observado en la hoja (9.03 ± 0.05 %) refleja su riqueza mineral, característica ampliamente documentada para *M. oleifera*, particularmente en calcio, potasio, hierro y magnesio (Fahey, 2005; Teixeira et al., 2014). Este valor se encuentra dentro de los intervalos reportados para hojas secas de moringa (7–11 %), y está estrechamente asociado con la elevada fracción de fibra insoluble, que favorece la retención de minerales en la matriz vegetal (Sánchez-Machado et al., 2010).

La fracción fibrosa de la hoja mostró un predominio claro de fibra insoluble (32.06 ± 1.88 %) frente a la soluble (5.92 ± 0.89 %), patrón que coincide con lo reportado para hojas de moringa y otros vegetales foliares ricos en celulosa, hemicelulosas y lignina (Teixeira et al., 2014; Gopalakrishnan et al., 2016). Esta proporción explica el potencial fisiológico de la hoja completa en la modulación del tránsito intestinal y en la reducción de la absorción de lípidos y glucosa, efectos documentados en modelos animales y humanos (Mbikay, 2012). En contraste, el concentrado proteico de moringa (CPMO) presentó una modificación sustancial de la composición bromatológica, resultado directo del proceso de extracción asistida por ultrasonido y precipitación alcalina. El contenido de proteína se incrementó de manera notable hasta 53.97 ± 1.43 %, lo que representa un enriquecimiento proteico cercano al 84 % respecto a la hoja original. Valores similares han sido reportados en concentrados proteicos de moringa obtenidos por métodos acuosos y alcalinos, con contenidos que oscilan entre 50 y 65 % de proteína, dependiendo de las condiciones de extracción y del pH de precipitación (Makkar & Becker, 1996; Sánchez-Machado et al., 2010).

La reducción significativa del contenido de cenizas en el CPMO (2.07 ± 0.041 %) confirma la eliminación de una fracción importante de minerales solubles durante el proceso de extracción, fenómeno ampliamente descrito en la obtención de concentrados proteicos vegetales (Sánchez-Machado et al., 2010). De manera paralela, la disminución de carbohidratos (5.43 ± 0.56 %) indica la remoción de polisacáridos no estructurales y compuestos solubles, contribuyendo a una mayor pureza proteica del concentrado. Un aspecto relevante del CPMO es el incremento marcado del contenido de lípidos (15.35 ± 0.15 %), en comparación con la hoja completa. Este comportamiento ha sido observado previamente en concentrados proteicos de moringa y se asocia a la coextracción de fracciones

lipídicas ligadas a proteínas de membrana y complejos lipoproteicos, especialmente cuando se emplean métodos físicos intensivos como ultrasonido (Makkar & Becker, 1996; Teixeira et al., 2014). Aunque este aumento puede influir en la estabilidad oxidativa del ingrediente, también puede aportar compuestos liposolubles bioactivos, como tocoferoles y carotenoides.

La fracción de fibra dietética se redujo de manera considerable en el CPMO, particularmente la fibra soluble (0.71 ± 0.07 %) y la insoluble (17.38 ± 0.99 %), resultado esperable dada la separación de la matriz estructural de la hoja durante la extracción. Esta disminución favorece la biodisponibilidad proteica y hace del CPMO un ingrediente más adecuado para fortificación de alimentos, al minimizar efectos tecnológicos adversos asociados a altos contenidos de fibra, como interferencias en la textura o la digestibilidad (Serna-Saldívar, 2015).

Tabla 10. Análisis bromatológico de la harina de hoja de *M. oleifera* (HMO) y concentrado proteico de *M. oleifera* (CPMO)

Parámetro	HMO	CPMO
Ceniza	9.03 ± 0.05^a	2.07 ± 0.041^b
Proteínas	29.38 ± 1.00^b	53.97 ± 1.43^a
Lípidos	5.46 ± 0.38^b	15.35 ± 0.15^a
Fibra soluble	5.92 ± 0.89^a	0.71 ± 0.07^b
Fibra insoluble	32.06 ± 1.88^a	17.38 ± 0.99^b
Carbohidratos	10.44 ± 0.62^a	5.43 ± 0.56^b

HMO: Harina de *Moringa oleifera*. CPMO: Concentrado proteico de *Moringa oleifera*. Valor medio calculado a partir de tres réplicas $\pm$ desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

La comparación entre hoja de *M. oleifera* y CPMO evidencia que el proceso de concentración proteica no solo incrementa de forma sustancial el contenido de proteína, sino que redefine el perfil nutricional del ingrediente, orientándolo hacia aplicaciones específicas de enriquecimiento proteico. Este comportamiento respalda la estrategia empleada en el desarrollo de tortillas funcionales, donde la hoja aporta fibra y compuestos bioactivos, mientras que el concentrado proteico permite corregir de manera más eficiente la limitación aminoacídica del maíz.

3.4.2 Perfil de aminoácidos de la harina y concentrado proteico de la hoja de *M. oleifera*

El análisis del perfil de aminoácidos de la harina de hoja de *Moringa oleifera* (HMO) reportado por Tranquilino-Rodríguez, et al (2025) confirma su valor como fuente vegetal con un contenido elevado y relativamente equilibrado de aminoácidos esenciales y no esenciales. El contenido total de aminoácidos en la HMO fue de 25.85 g/100 g de muestra, destacando concentraciones relevantes de lisina (2.64 g/100 g), arginina (1.83 g/100 g), valina (1.65 g/100 g), treonina (1.40 g/100 g) e isoleucina (1.30 g/100 g). Este perfil coincide con reportes previos que describen a la proteína de moringa como una de las fuentes vegetales con mayor aporte de aminoácidos esenciales, particularmente lisina, lo que la diferencia de cereales como el maíz y el trigo, donde este aminoácido es limitante (Makkar & Becker, 1996; Gopalakrishnan et al., 2016).

La obtención del concentrado proteico de moringa (CPMO) permitió una concentración marcada de aminoácidos, duplicando el contenido total hasta 50.37 g/100 g. Este incremento se reflejó de manera consistente en prácticamente todos los aminoácidos analizados, con aumentos notables en lisina (4.78 g/100 g), leucina (5.59 g/100 g), valina (2.88 g/100 g), isoleucina (2.45 g/100 g), fenilalanina (2.57 g/100 g) y arginina (3.19 g/100 g). La leucina, aminoácido clave para la síntesis proteica y la regulación del metabolismo muscular, mostró uno de los incrementos más pronunciados tras el proceso de concentración, lo que resulta relevante desde una perspectiva de calidad y funcionalidad proteica (FAO/WHO, 2007).

Un aspecto particularmente relevante es el comportamiento del triptófano, cuyo contenido pasó de 0.30 g/100 g en la HMO a 1.95 g/100 g en el CPMO. Dado que el triptófano es uno de los aminoácidos más deficientes en el maíz y uno de los más sensibles a los procesos térmicos, su elevada concentración en el CPMO refuerza el potencial de este ingrediente como corrector del perfil aminoacídico de productos a base de cereales (Bressani, 1990; Serna-Saldívar, 2015). En contraste, la metionina mostró valores similares entre HMO y CPMO (0.66 y 0.61 g/100 g, respectivamente), lo que concuerda con lo descrito para proteínas vegetales foliares, donde los aminoácidos azufrados suelen mantenerse en concentraciones moderadas.

Desde el punto de vista de su aplicación en tortillas de maíz, el perfil aminoacídico observado en la HMO y, de manera más acentuada, en el CPMO explica los incrementos registrados en lisina, triptófano, treonina y aminoácidos de cadena ramificada en las formulaciones fortificadas. La complementariedad entre la proteína del maíz, rica en ácido glutámico y prolina pero deficiente en lisina y triptófano, y la proteína de moringa, con un perfil más balanceado, permite mejorar la calidad global de la proteína dietaria sin recurrir a fuentes de origen animal (Young & Pellett, 1994). En este contexto, los resultados obtenidos respaldan el uso de la moringa no solo como un ingrediente con alto contenido proteico, sino como un componente funcional capaz de potenciar de manera específica la calidad aminoacídica de las tortillas de maíz, manteniendo una formulación basada en materias primas vegetales de origen local.

Tabla 11. Perfil de aminoácidos de HMO y CMPO

Aminoácidos (AA)	(g AA / 100 g de muestra)	
	HMO	CPMO
Arginina	1.83	3.19
Histidina	0.47	0.81
Treonina	1.4	2.13
Valina	1.65	2.88
Metionina	0.66	0.61
Triptófano	0.3	1.95
Fenilalanina	1.34	2.57
Isoleucina	1.3	2.45
Leucina	0.27	5.59
Lisina	2.64	4.78
Ácido aspártico	2.91	5.07
Ácido glutámico	5.92	6.87
Serina	1.06	1.68
Glicina	1.31	2.21
Alanina	1.53	3.22
Tirosina	0.69	1.8
Cistina	0.02	0.06
Prolina	0.55	2.5
Total	25.85	50.37

3.4.3 Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de la harina y concentrado proteico hoja de *Moringa oleifera*

La hoja deshidratada de *Moringa oleifera* mostró una concentración elevada de compuestos fenólicos totales (1213.46 ± 2.7 mgEAG/100 g), confirmando su alta densidad antioxidante y su potencial como ingrediente funcional. Este valor se sitúa en el rango superior de los reportes disponibles para hojas de moringa, donde se han documentado concentraciones entre 800 y 1500 mgEAG/100 g en base seca, dependiendo del origen geográfico, método de secado y solvente de extracción (Sánchez-Machado et al., 2010; Gopalakrishnan et al., 2016). La elevada proporción de flavonoides totales observada (767.43 ± 1.8 mgEQ/100 g) respalda que una fracción importante de estos fenoles corresponde a flavonoles, principalmente quercetina y kaempferol, compuestos ampliamente descritos como responsables de la actividad antioxidante de la moringa (Fahey, 2005; Mbikay, 2012).

En contraste, el concentrado proteico de moringa presentó una disminución moderada pero significativa en el contenido de fenoles totales (1020.20 ± 3.0 mgEAG/100 g) y flavonoides (645.54 ± 0.9 mgEQ/100 g) respecto a la hoja completa. Esta reducción es

consistente con la literatura, ya que durante los procesos de extracción acuosa y precipitación alcalina una fracción de los compuestos fenólicos solubles puede perderse en el sobrenadante o degradarse parcialmente por efecto del pH y la cavitación inducida por ultrasonido (Makkar & Becker, 1996; Teixeira et al., 2014). No obstante, la retención de más del 80 % de los fenoles totales originales indica que una proporción considerable de estos compuestos permanece asociada a la fracción proteica, posiblemente mediante interacciones no covalentes entre polifenoles y proteínas, fenómeno previamente descrito en matrices vegetales ricas en flavonoides (Rawel et al., 2001). El contenido de antocianinas en la hoja de moringa fue bajo (3.53 ± 0.8 mgEC3G/100 g) y no se detectó en el CPMO, lo cual concuerda con lo reportado para *M. oleifera*, una especie que no se considera fuente relevante de antocianinas. La presencia de valores traza en la hoja puede atribuirse a interferencias espectrofotométricas o a la presencia de otros compuestos fenólicos con comportamiento similar en el método de cuantificación, como ha sido señalado en estudios previos (Sánchez-Machado et al., 2010; Gopalakrishnan et al., 2016). La ausencia de antocianinas en el CPMO confirma que estos pigmentos no contribuyen de manera significativa al perfil antioxidante del concentrado.

La capacidad antioxidante determinada mediante los ensayos DPPH• y ABTS•⁺ mostró una relación inversa clara con el contenido de compuestos fenólicos. La hoja de moringa presentó valores de IC₅₀ de 160.29 ± 2.2 µg/mL para DPPH• y 42.78 ± 4.8 µg/mL para ABTS•⁺, lo que evidencia una elevada capacidad de neutralización de radicales libres. Estos valores son comparables a los reportados para extractos de hoja de moringa obtenidos con solventes hidroalcohólicos, donde se han documentado IC₅₀ de DPPH• entre 100 y 200 µg/mL y de ABTS•⁺ entre 30 y 60 µg/mL (Mbikay, 2012; Teixeira et al., 2014).

En el CPMO, los valores de IC₅₀ aumentaron ligeramente (190.05 ± 2.1 µg/mL para DPPH• y 53.67 ± 2.6 µg/mL para ABTS•⁺), reflejando una reducción moderada en la potencia antioxidante, coherente con la disminución observada en el contenido fenólico. Sin embargo, la conservación de una actividad antioxidante elevada sugiere que los compuestos fenólicos remanentes mantienen una alta reactividad frente a radicales libres, particularmente en el sistema ABTS•⁺, más sensible a fenoles hidrosolubles y complejos fenólico-proteicos (Žilić et al., 2012). Este comportamiento ha sido descrito previamente en concentrados proteicos vegetales, donde la actividad antioxidante no depende exclusivamente de la concentración total de fenoles, sino también de su estructura química y de su interacción con la matriz proteica (Rawel et al., 2001). Aunque el proceso de concentración proteica reduce parcialmente el contenido total de compuestos fenólicos y flavonoides, el CPMO conserva una fracción antioxidante funcionalmente activa. Esta característica resulta particularmente relevante para su aplicación en matrices alimentarias como la tortilla de maíz, donde el CPMO puede aportar simultáneamente proteína de alta calidad y una capacidad antioxidante significativa, complementando el perfil fenólico intrínseco del maíz y de otros ingredientes funcionales empleados en la formulación.

Tabla 12. Determinación de ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante en HMO y CMPO

Parámetro	HMO	CPMO
Fenoles	1213.46 ± 2.7 a	1020.20 ± 3.0 b
Flavonoides	767.43 ± 1.8 a	645.54 ± 0.9 b
Antocianinas	3.53 ± 0.8	ND
DPPH IC50	160.29 ± 2.2 b	190.05 ± 2.1 a
ABTS IC50	42.78 ± 4.8 b	53.67 ± 2.6 a

Valor medio calculado a partir de tres réplicas ± desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$). ND= No detectado. El contenido de los compuestos fenólicos esta expresado en mg equivalentes de ácido gálico en 100 g. El contenido de flavonoides esta expresado en mg equivalentes de quercetina en 100 g. El contenido de antocianinas esta expresado en mg equivalentes de cianidina-3-glucósido en 100 g. La concentración media efectiva esta expresada en µg de extracto mL.

3.4.4 Composición bromatológica de tortillas de maíz y tortillas fortificadas con moringa

La composición bromatológica de las tortillas elaboradas a partir de maíces criollos evidenció diferencias claras en función del tipo de maíz y del ingrediente de fortificación empleado. En las tortillas control, el contenido de proteína osciló entre 7.96 ± 1.2 % en la tortilla de maíz rojo (TMR) y 10.03 ± 0.15 % en la tortilla de maíz azul (TMA), valores que se encuentran dentro de los rangos reportados para tortillas tradicionales elaboradas por nixtamalización, típicamente entre 7 y 10 % en base seca (Serna-Saldívar, 2015; Palacios-Fonseca et al., 2009). La mayor concentración proteica observada en TMA puede atribuirse tanto al perfil intrínseco del maíz azul como a la retención diferencial de proteínas de la aleurona durante la nixtamalización, fenómeno previamente documentado en variedades pigmentadas (Mora-Rochín et al., 2010).

La adición de harina de hoja de *Moringa oleifera* generó incrementos moderados pero consistentes en el contenido proteico de las tortillas (TMAH, TMBH y TMRH), con valores cercanos a 10–11 %. Este comportamiento concuerda con reportes donde la incorporación de hojas o polvos vegetales ricos en proteína produce aumentos limitados debido al efecto de dilución y a la presencia simultánea de fibra dietética, la cual restringe la proporción proteica total en el producto final (Sánchez-Marroquín et al., 2021; Olvera et al., 2016). En contraste, la fortificación con concentrado proteico de moringa (TMACP, TMBCP y TMRCP) permitió un incremento más marcado del contenido de proteína, alcanzando valores superiores al 12 %, lo que representa un aumento cercano al 25–35 % respecto a las tortillas control. Este efecto confirma la mayor eficiencia del CPMO como ingrediente de enriquecimiento proteico, coherente con su composición previamente discutida y con lo reportado para concentrados proteicos vegetales aplicados en matrices cerealistas (Makkar & Becker, 1996; Teixeira et al., 2014).

El contenido de cenizas mostró un aumento general en las tortillas fortificadas, especialmente en aquellas adicionadas con harina de moringa (hasta 2.20 ± 0.6 % en TMRH), reflejando el aporte mineral característico de las hojas de *M. oleifera*, ricas en calcio, potasio y hierro (Fahey, 2005). Aunque las tortillas con CPMO presentaron valores de ceniza menores que las fortificadas con harina, estos se mantuvieron por encima de las tortillas control, indicando que incluso tras la concentración proteica persiste un aporte mineral relevante.

En cuanto a los lípidos, las tortillas control presentaron valores bajos (2.09–2.66 %), consistentes con lo reportado para tortillas tradicionales (Serna-Saldívar, 2015). La incorporación de CPMO incrementó ligeramente esta fracción, particularmente en TMAP y TMBCP, efecto atribuible a la coextracción de lípidos asociada al concentrado proteico, como se ha documentado en proteínas vegetales obtenidas por métodos alcalinos y físicos intensivos (Teixeira et al., 2014). No obstante, los valores permanecen dentro de rangos considerados tecnológicos y nutricionalmente aceptables para productos de consumo habitual.

La fracción de fibra dietética mostró un patrón diferencial claramente influenciado por el tipo de fortificante. Las tortillas control presentaron un predominio de fibra insoluble (≈ 7.0 – 7.4 %), acorde con la matriz estructural del maíz nixtamalizado (Salinas-Moreno et al., 2013). La adición de harina de moringa provocó un incremento notable tanto en fibra soluble como insoluble, destacando particularmente TMRH, que alcanzó 2.21 ± 0.6 % de fibra soluble y 8.7 ± 0.7 % de fibra insoluble. Este comportamiento es consistente con la elevada fracción fibrosa de la hoja de moringa y con estudios que reportan mejoras significativas en el contenido total de fibra al incorporar hojas deshidratadas en productos cerealistas (Mbikay, 2012; Sánchez-Marroquín et al., 2021). En contraste, las tortillas con CPMO mostraron incrementos más moderados en fibra, lo que refuerza la diferencia funcional entre ambos ingredientes: la harina de moringa como fuente de fibra dietética y el CPMO como fuente concentrada de proteína.

El contenido de carbohidratos totales disminuyó progresivamente en función del nivel de fortificación, con los valores más bajos observados en las tortillas con CPMO (≈ 72 – 73 %). Esta reducción es coherente con el incremento relativo de proteínas, lípidos y fibra, y coincide con reportes donde la sustitución parcial de harina de maíz por ingredientes proteicos o fibrosos reduce la fracción de almidón disponible (Serna-Saldívar, 2015; Gogoi et al., 2023).

Tabla 13. Análisis bromatológico de tortillas de maíz, tortillas adicionadas con harina y concentrado proteico de *M. oleifera*

Parámetro	TMA	TMB	TMR	TMA H	TMB H	TMR H	TMA CP	TMB CP	TMR CP
Ceniza	1.54 $\pm 0.02^d$	1.35 $\pm 0.10^e$	1.56 $\pm 0.2^d$	2.09 $\pm 0.03^a$	1.82 $\pm 0.07^c$	2.2 $\pm$ 0.6 ^a	1.87 $\pm 0.22^b$	1.87 $\pm 0.22^b$	1.88 $\pm 0.4^b$
Proteína	10.03 $\pm 0.15^e$	9.69 $\pm 0.10^f$	7.96 $\pm 1.2^g$	10.92 $\pm 0.02^d$	10.03 $\pm 0.15^e$	9.54 $\pm 1.1^f$	12.55 $\pm 0.12^a$	12.06 $\pm 0.17^c$	12.31 $\pm 0.6^b$

Lípidos	2.66 ± 0.15 ^d	2.6 ± 0.06 ^d	2.09 ± 0.3 ^g	2.77 ± 0.15 ^c	3.79 ± 0.40 ^a	2.2 ± 0.4 ^f	2.98 ± 0.09 ^b	3.03 ± 0.20 ^b	2.77 ± 0.2 ^c
Fibra soluble	1.05 ± 0.04 ^f	1.0 ± 0.4 ^g	1.04 ± 0.3 ^f	1.9 ± 0.2 ^c	1.9 ± 0.4 ^c	2.21 ± 0.6 ^a	1.9 ± 0.1 ^c	1.78 ± 0.2 ^d	2.1 ± 0.4 ^b
Fibra insoluble	7.06 ± 0.3 ^f	6.99 ± 0.2 ^g	7.39 ± 0.5 ^e	8.21 ± 1.2 ^c	8.01 ± 0.1 ^d	8.7 ± 0.7 ^a	8.24 ± 0.3 ^c	8.25 ± 0.5 ^c	8.51 ± 0.8 ^b
Carbohidratos	77.66 ± 0.4 ^c	78.3 7 ± 0.3 ^b	79.9 6 ± 0.9 ^a	74.11 ± 0.12 ^f	74.45 ± 0.1 ^f	75.1 5 ± 0.4 ^d	72.46 ± 0.3 ^h	73.01 ± 0.53 ^g	72.43 ± 0.65 ^h

TMA: Tortilla de maíz azul. TMB: Tortilla de maíz blanco. TMR: Tortilla de maíz rojo. TMAH: Tortilla de maíz azul con HMO. TMBH: Tortilla de maíz blanco con HMO. TMRH: Tortilla de maíz rojo con HMO. TMACP: Tortilla de maíz azul con CPMO. TMBCP: Tortilla de maíz blanco con CPMO. TMRCP: Tortilla de maíz rojo con CPMO. Valor medio calculado a partir de tres réplicas ± desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (p<0.05).

Desde una perspectiva de funcionalidad nutricional, las tortillas de maíz azul control (TMA) y aquellas fortificadas con CPMO (TMACP) destacan por su mayor densidad proteica dentro del conjunto de productos evaluados, mientras que las tortillas elaboradas con maíz rojo y harina de moringa (TMR y TMRH) concentran las fracciones más elevadas de fibra dietética total. Esta diferenciación composicional sugiere perfiles nutricionales contrastantes, con aplicaciones potenciales específicas dentro de estrategias de mejora de la calidad proteica o de incremento del consumo de fibra dietética en la dieta habitual, manteniendo como base un alimento de consumo tradicional.

3.4.5 Perfil de aminoácidos de las tortillas de maíz y tortillas adicionadas con moringa

El análisis del perfil de aminoácidos de las tortillas control elaboradas a partir de maíz criollo (TMA, TMB y TMR) confirma el patrón característico de las proteínas del maíz, en el cual los aminoácidos no esenciales como ácido glutámico/glutamina, alanina y prolina predominan cuantitativamente, mientras que aminoácidos esenciales como lisina y triptófano se encuentran en concentraciones relativamente bajas. En las tortillas control, la lisina osciló entre 0.215 y 0.234 g/100 g de muestra, y el triptófano entre 0.046 y 0.057 g/100 g, valores consistentes con lo reportado para productos nixtamalizados derivados de maíz convencional y criollo, donde estos aminoácidos son considerados limitantes primarios de la calidad proteica (Bressani, 1990; Serna-Saldívar, 2015).

La adición de harina de hoja de *Moringa oleifera* (TMAH, TMBH y TMRH) produjo un incremento sistemático en la mayoría de los aminoácidos esenciales, destacando aumentos en lisina, treonina, valina, isoleucina y leucina respecto a las tortillas control. En particular, la lisina aumentó hasta valores de 0.288–0.293 g/100 g, lo que representa un incremento aproximado del 20–35 % dependiendo de la variedad de maíz empleada. De manera similar, el triptófano mostró incrementos consistentes, alcanzando valores de hasta 0.077 g/100 g en TMRH, lo cual resulta relevante considerando su papel limitante en proteínas de cereales (FAO/WHO, 2007). Estos cambios reflejan la contribución del perfil aminoacídico más equilibrado de la proteína de moringa, previamente documentado como rico en aminoácidos esenciales, particularmente lisina y treonina (Gopalakrishnan et al., 2016).

El efecto más marcado se observó en las tortillas adicionadas con concentrado proteico de moringa (TMACP, TMBCP y TMRCP), donde el contenido total de aminoácidos se incrementó hasta valores cercanos a 9.7–9.9 g/100 g, en comparación con 7.6–7.8 g/100 g en las tortillas control. En estos tratamientos, la lisina alcanzó concentraciones de 0.356–0.358 g/100 g, mientras que el triptófano se situó entre 0.088 y 0.097 g/100 g, prácticamente duplicando los valores observados en las tortillas sin fortificación. Asimismo, se observaron incrementos relevantes en leucina ($\approx$ 1.09–1.13 g/100 g), isoleucina y valina, aminoácidos clave para la síntesis proteica y el mantenimiento de la masa corporal, particularmente en etapas de crecimiento (FAO, 2013).

El enriquecimiento proteico también se reflejó en aminoácidos como histidina y arginina, los cuales mostraron incrementos progresivos desde las tortillas control hacia las formulaciones con harina y, especialmente, con concentrado proteico de moringa. La histidina, considerada esencial en etapas de crecimiento, alcanzó valores de hasta 0.231 g/100 g en TMACP, mientras que la arginina superó los 0.44 g/100 g en los mismos tratamientos, lo que puede contribuir a un perfil funcional más completo de la proteína dietaria (Young & Pellett, 1994).

Tabla 14. Perfil de aminoácidos de tortillas de maíz, tortillas de maíz con harina y concentrado de la hoja de *M. oleifera*

Aminoácido	TM A	TM B	TM R	TMA H	TMB H	TMR H	TMAC P	TMBC P	TMRC P	FAO & IAE A (2024)
Ácido aspártico + Asparagina	63	60.1	62.9	66.7	66.9	67.1	69.4	71.7	71.7	-
Ácido glutámico + Glutamina	206.8	205.2	208.4	198.9	206.1	201.2	186.4	186.9	191	-
Serina	51	48.3	48.9	50.5	48.7	48.5	48.1	48.2	49	-
Histidina	24.2	24.5	21.1	23.2	23.9	23.7	23.4	21.5	22.6	15
Glicina	37.6	37.3	37.6	38.3	37.9	37.5	39.9	40.7	40.3	
Treonina	36.3	34.1	35	38.6	36.7	37.1	38.1	38.6	39.4	23
Arginina	42.8	40	38.5	45.6	42	41.5	45.1	43.1	44.7	-
Alanina	75.9	73.2	73.5	73.5	71.9	71.1	69.9	69.8	71.4	-
Tirosina	18.6	16.7	18.1	21.2	17.7	18	20.1	20.4	19.4	-
Cistina	8.9	10.5	11.4	9.1	10	10.9	8.5	9.5	11	-
Valina	47.2	46.7	49.3	48.4	49.7	49.7	49.1	50.8	50.5	30
Metionina	20.5	15.9	16.1	22.2	14.8	15.1	21	14.1	14.4	22
Triptófano	6.8	6	7.3	8.4	7.1	8.9	9.8	9.1	9.4	6
Fenilalanina	50.4	48.1	46.5	51.3	49.6	49.2	51	51.3	51.4	38

Isoleucina	33.2	33.5	32.6	35.4	35.1	34.7	36.7	37.1	37.4	30
Leucina	124.4	120	120.1	119.4	116.7	115.6	113.7	112.8	115.3	59
Lisina	29.8	29.5	27.5	32.9	32.6	33.8	36.3	36.9	36.3	45
Hidroxiprolina	61.6	68.9	59.7	58.6	53.5	58.3	58	64.5	49.1	-
Prolina	60.9	81.6	85.6	57.6	79.2	78	75.3	73.1	75.8	-

TMA: Tortilla de maíz azul. TMB: Tortilla de maíz blanco. TMR: Tortilla de maíz rojo. TMAH: Tortilla de maíz azul con harina de moringa. TMBH: Tortilla de maíz blanco con harina de moringa. TMRH: Tortilla de maíz rojo con harina de moringa. TMAP: Tortilla de maíz azul con concentrado proteico de moringa. TMBP: Tortilla de maíz blanco con concentrado proteico de moringa. TMRP: Tortilla de maíz rojo con concentrado proteico de moringa.

Estos resultados evidencian que la incorporación de *M. oleifera*, y de manera más pronunciada su concentrado proteico, permite corregir parcialmente las deficiencias aminoacídicas inherentes al maíz, particularmente en lisina y triptófano, sin alterar de forma desfavorable el balance global de aminoácidos. Este comportamiento confirma la complementariedad nutricional cereal–fuente vegetal foliar y respalda el uso de estas formulaciones como matrices con potencial mejorado de calidad proteica frente a las tortillas tradicionales, en concordancia con lo reportado para estrategias de fortificación proteica basadas en leguminosas y hojas comestibles (Bressani, 1990; Serna-Saldívar, 2015; Gopalakrishnan et al., 2016).

3.4.6 Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de tortillas de maíz y tortillas de maíz fortificadas con moringa

El contenido de fenoles totales en las tortillas control elaboradas exclusivamente con maíz criollo mostró valores relativamente homogéneos, con concentraciones de 41.75 ± 8.9 mgEAG/100 g en la tortilla de maíz azul (TMA), 33.86 ± 1.3 mgEAG/100 g en la blanca (TMB) y 39.39 ± 6.9 mgEAG/100 g en la roja (TMR). Estos valores se encuentran dentro del rango reportado para tortillas tradicionales elaboradas a partir de maíces criollos nixtamalizados, donde se han documentado concentraciones de fenoles totales entre 20 y 60 mgEAG/100 g, dependiendo de la variedad y de las condiciones del proceso alcalino (Mora-Rochín et al., 2010; Salinas-Moreno et al., 2013). La ligera superioridad observada en TMA y TMR concuerda con la presencia residual de compuestos fenólicos asociados al pericarpio y a la capa de aleurona en maíces pigmentados.

La adición de harina de hoja de *Moringa oleifera* generó un incremento sustancial del contenido fenólico en todas las variedades, destacando TMAH (100.40 ± 1.95 mgEAG/100 g) y TMRH (84.31 ± 9.02 mgEAG/100 g). Este aumento es coherente con la elevada concentración de polifenoles previamente observada en la hoja de moringa y confirma que una fracción relevante de estos compuestos resiste el proceso de cocción de la tortilla. Resultados similares han sido reportados en tortillas enriquecidas con ingredientes vegetales

ricos en polifenoles, donde se observan incrementos de dos a tres veces en el contenido fenólico total respecto al control (Sánchez-Marroquín et al., 2021; Núñez-Sánchez et al., 2020).

Las tortillas fortificadas con concentrado proteico de moringa (TMACP, TMBCP y TMRCP) presentaron los valores más elevados de fenoles totales, alcanzando hasta 109.90 ± 0.95 mgEAG/100 g en TMACP. Este comportamiento resulta particularmente relevante, ya que evidencia que el CPMO, además de su aporte proteico, conserva una fracción considerable de compuestos fenólicos, probablemente asociados a proteínas y complejos fenólico-proteicos menos susceptibles a pérdidas durante el procesamiento térmico, como ha sido descrito para matrices vegetales concentradas (Teixeira et al., 2014; Gopalakrishnan et al., 2016).

El perfil de flavonoides totales siguió una tendencia paralela a la de los fenoles. Las tortillas control presentaron valores relativamente bajos ($11.0\text{--}15.02$ mgEQ/100 g), consistentes con lo reportado para tortillas nixtamalizadas tradicionales (Serna-Saldívar, 2015). En contraste, las tortillas con harina de moringa mostraron incrementos notables, particularmente TMAH (48.79 ± 1.7 mgEQ/100 g), mientras que las tortillas con CPMO alcanzaron las concentraciones más elevadas, con valores superiores a 50 mgEQ/100 g en TMACP. Estos resultados reflejan la alta proporción de flavonoles presentes en la moringa, principalmente quercetina y kaempferol, los cuales han sido ampliamente documentados como los principales contribuyentes a su capacidad antioxidante (Fahey, 2005; Sánchez-Machado et al., 2010).

En cuanto a las antocianinas, las tortillas elaboradas con maíz azul y rojo mostraron concentraciones elevadas en el control, con valores de 161.87 ± 4.7 mgEC3G/100 g en TMA y 149.99 ± 2.2 mgEC3G/100 g en TMR, confirmando que una fracción significativa de estos pigmentos resiste el proceso de nixtamalización y cocci3n. Estos valores se sitúan dentro de los rangos altos reportados para tortillas de maíz pigmentado ($100\text{--}200$ mgEC3G/100 g), dependiendo de la raza y del método de cuantificación (Salinas-Moreno et al., 2019; Santiago-Ramos et al., 2018). La ausencia de antocianinas en las tortillas de maíz blanco es consistente con lo ampliamente descrito para variedades no pigmentadas. La adici3n de harina de moringa no modific3 sustancialmente el contenido de antocianinas en las tortillas pigmentadas, lo que era esperable dado que *M. oleifera* no constituye una fuente relevante de estos compuestos. Por el contrario, las tortillas fortificadas con CPMO mostraron una ligera reducci3n en el contenido de antocianinas, especialmente en TMRCP (102.84 ± 0.8 mgEC3G/100 g), efecto atribuible principalmente a un fenómeno de diluci3n de la fracci3n de maíz pigmentado más que a una degradaci3n directa, como se ha observado en formulaciones con sustituciones parciales de harina (Santiago-Ramos et al., 2018).

La capacidad antioxidante evaluada mediante los ensayos DPPH• y ABTS•⁺ mostr3 una relaci3n inversa clara con el contenido de compuestos fenólicos. Las tortillas control presentaron los valores más elevados de IC₅₀, particularmente en DPPH• ($\approx 820\text{--}875$ µg/mL), indicando una menor capacidad de neutralizaci3n de radicales. Estos valores concuerdan con lo reportado para tortillas tradicionales, donde la p3rdida de polifenoles durante la nixtamalizaci3n limita la actividad antioxidante (Mora-Rochín et al., 2010; Žilić et al., 2012).

La fortificación con harina de moringa redujo de manera significativa los valores de IC₅₀ en ambos ensayos, destacando TMAH y TMRH, mientras que las tortillas con CPMO presentaron las mayores mejoras antioxidantes, con valores de DPPH• IC₅₀ tan bajos como 391.60 ± 9.1 µg/mL en TMAP y de ABTS•⁺ IC₅₀ de 298.09 ± 2.6 µg/mL. Este comportamiento confirma la elevada eficacia antioxidante de los polifenoles de moringa, particularmente aquellos con alta reactividad frente a radicales hidrofílicos y lipofílicos, como ha sido ampliamente documentado en estudios in vitro (Gopalakrishnan et al., 2016; Mbikay, 2012). La tortilla de maíz azul control (TMA) conserva un contenido elevado de antocianinas, mientras que la fortificación con CPMO (TMAP) permite potenciar de manera significativa el contenido de fenoles totales y flavonoides, así como la capacidad antioxidante global. De forma complementaria, la tortilla de maíz rojo con harina de moringa (TMRH) combina una fracción relevante de antocianinas con un incremento marcado en fibra dietética y compuestos fenólicos, configurando perfiles antioxidantes diferenciados que podrían resultar relevantes en estrategias nutricionales orientadas a la modulación del estrés oxidativo.

Tabla 15. Determinación de ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante en tortillas de maíz, tortillas de maíz con harina y concentrado de la hoja de *M. oleifera*.

Parámetro	TMA	TMB	TMR	TMAH	TMBH	TMRH	TMAP	TMBCP	TMRCP
Fenoles	41.75 ± 8.9 ^e	33.86 ± 1.3 ^f	39.39 ± 6.9 ^e	100.40 ± 1.95 ^b	73.80 ± 2.92 ^e	84.31 ± 9.02 ^d	109.90 ± 0.95 ^a	94.01 ± 4.40 ^c	102.02 ± 2.20 ^b
Flavonoides	15.02 ± 1.2 ^f	11.0 ± 1.7 ^h	12.52 ± 1.3 ^g	48.79 ± 1.7 ^b	29.64 ± 3.7 ^f	35.65 ± 1.8 ^e	50.50 ± 2.4 ^a	41.68 ± 2.8 ^c	45.44 ± 5.0 ^c
Antocianinas	161.87 ± 4.7 ^a	ND	149.99 ± 2.2 ^c	154.50 ± 2.0 ^b	ND	148.02 ± 0.5 ^c	142.01 ± 0.9 ^d	ND	102.84 ± 0.8 ^e
DPPH IC50	820.61 ± 5.2 ^b	874.74 ± 0.9 ^a	822.32 ± 10.4 ^b	479.76 ± 10.9 ^e	531.78 ± 2.3 ^c	484.19 ± 5.5 ^d	391.60 ± 9.1 ^g	479.44 ± 5.7 ^e	428.21 ± 4.4 ^f
ABTS IC50	645.16 ± 3.1 ^c	704.74 ± 48 ^a	651.05 ± 2.8 ^b	351.12 ± 2.2 ^g	395.84 ± 1.7 ^f	370.48 ± 4.7 ^g	298.09 ± 2.6 ⁱ	398.15 ± 3.4 ^d	315.15 ± 4.1 ^h

TMA: Tortilla de maíz azul. TMB: Tortilla de maíz blanco. TMR: Tortilla de maíz rojo. TMAH: Tortilla de maíz azul con harina de moringa. TMBH: Tortilla de maíz blanco con harina de moringa. TMRH: Tortilla de maíz rojo con harina de moringa. TMAP: Tortilla de maíz azul con concentrado proteico de moringa. TMBCP: Tortilla de maíz blanco con concentrado proteico de moringa. TMRCP: Tortilla de maíz rojo con concentrado proteico de moringa. Valor medio calculado a partir de tres réplicas ± desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (p<0.05). ND= No detectado. El contenido de los compuestos fenólicos esta expresado en mg equivalentes de ácido gálico en 100 g. El contenido de flavonoides esta expresado en mg equivalentes de quercetina en 100 g. El contenido de antocianinas esta expresado en mg equivalentes de cianidina-3-glucósido en 100 g. La concentración media efectiva esta expresada en µg/mL.

3.4.7 Propiedades reológicas de las tortillas

Las propiedades reológicas evaluadas permiten estimar el comportamiento tecnológico de las tortillas durante la cocción y el manejo posterior, aspectos directamente relacionados con la estructura del almidón, la retención de humedad y la interacción con fracciones proteicas y fibrosas. En términos generales, las tortillas control (TMA, TMB y TMR) presentaron un comportamiento adecuado, con grado de inflado cercano a 1, rolabilidad sin ruptura y pérdidas de peso durante la cocción inferiores al 5.3 %, valores que se consideran óptimos para tortillas elaboradas a partir de maíz nixtamalizado tradicional (Arámbula-Villa et al., 2001; Cuevas-Martínez et al., 2010).

La adición de harina de hoja de *Moringa oleifera* mostró efectos moderados sobre las propiedades mecánicas. Aunque el grado de inflado se mantuvo estable en la mayoría de las formulaciones, la tortilla de maíz rojo con harina de moringa (TMRHM) presentó un incremento en el índice de rolabilidad (2 ± 1.0), lo que sugiere una mayor susceptibilidad a la ruptura. Este comportamiento es consistente con la elevada fracción de fibra insoluble previamente observada en estas formulaciones, la cual puede interferir con la continuidad de la red de almidón gelatinizado y reducir la elasticidad de la masa (Serna-Saldívar, 2015; Gómez-Aldapa et al., 2016). De manera paralela, se observó un aumento en los valores de tensión en las tortillas con harina de moringa, particularmente en TMRHM, lo que indica una mayor rigidez estructural asociada al reforzamiento de la matriz por fibras vegetales.

En contraste, las tortillas fortificadas con concentrado proteico de moringa (TMACP, TMBCP y TMRCP) mantuvieron índices de inflado y rolabilidad comparables a los controles, lo que sugiere una mejor integración del CPMO en la matriz de la masa. Este comportamiento puede atribuirse a la menor proporción de fibra y a la mayor interacción proteína–almidón, que favorece la cohesión y extensibilidad del sistema durante la cocción (Teixeira et al., 2014; Palacios-Fonseca et al., 2009). No obstante, se registró un ligero incremento en la pérdida de peso durante la cocción en estas formulaciones (≈ 5.5 – 5.7 %), posiblemente relacionado con una menor capacidad de retención de agua debido al reemplazo parcial de almidón por proteína concentrada.



Figura 9. Prueba de pérdida de peso tras la cocción , grado de inflado y rolabilidad de tortilla.

Los parámetros instrumentales de corte y tensión reflejaron diferencias atribuibles tanto al tipo de maíz como al ingrediente de fortificación. Las tortillas elaboradas con maíz blanco tendieron a presentar valores más altos de fuerza de corte, lo que coincide con reportes previos que asocian este comportamiento con un mayor contenido relativo de almidón y una estructura menos porosa tras la gelatinización (Arámbula-Villa et al., 2001). En las tortillas con harina de moringa se observó un incremento general de la resistencia a la tensión, mientras que en las formulaciones con CPMO los valores se mantuvieron más cercanos a los controles, indicando que la fortificación proteica concentrada afecta en menor medida las propiedades mecánicas críticas de la tortilla.

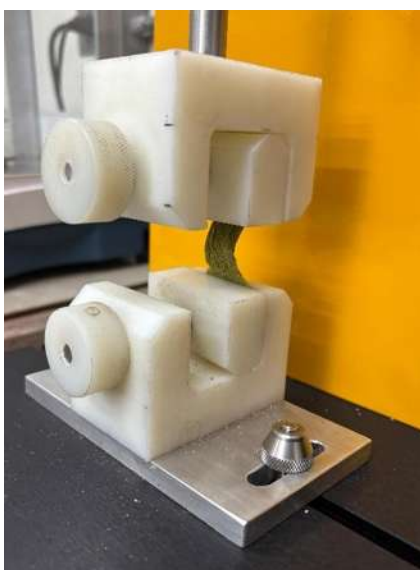


Figura 10. Prueba de tensión en tortilla

La incorporación de moringa, ya sea como harina o como concentrado proteico, no compromete de manera severa la calidad tecnológica de las tortillas, aunque la forma del ingrediente determina el tipo de modificación reológica observada. Mientras la harina de moringa tiende a incrementar rigidez y afectar la rolabilidad en formulaciones con mayor carga fibrosa, el CPMO permite conservar propiedades mecánicas cercanas a las tortillas tradicionales, manteniendo un equilibrio entre funcionalidad nutricional y desempeño tecnológico.

Tabla 16. Reología de las tortillas de maíz

Parámetro	TMA	TMB	TMR	TMAH	TMBH	TMRH	TMACP	TMBCP	TMRCP
Grado Inflado	1 ± 0 ^b	1 ± 0 ^b	1.67 ± 0.58 ^a	1 ± 0 ^b	1 ± 0 ^b	1.67 ± 0.58 ^a	1 ± 0 ^b	1 ± 0 ^b	1 ± 0 ^b
Rolabilidad	1 ± 0 ^c	1 ± 0 ^c	1 ± 0 ^c	1 ± 0 ^c	1 ± 0 ^c	2 ± 1.0 ^a	1 ± 0 ^c	1 ± 0 ^c	1.33 ± 0.58 ^b
Pérdida de peso	5.17 ± 0.12 ^d	5.23 ± 0.46 ^c	4.83 ± 0.71 ^e	5.27 ± 0.06 ^c	5.5 ± 0.20 ^b	5.27 ± 0.60 ^c	5.67 ± 0.21 ^a	5.47 ± 0.21 ^b	5.7 ± 0.26 ^a
Corte (N)	2.56 ± 0.03 ^d	3.24 ± 0.29 ^a	1.80 ± 0.08 ^h	2.55 ± 0.21 ^e	3.16 ± 0.07 ^b	3.18 ± 0.20 ^b	2.90 ± 0.13 ^c	2.33 ± 0.07 ^f	2.21 ± 0.03 ^g
Tensión (N)	2.41 ± 0.02 ^e	2.74 ± 0.16 ^d	2.38 ± 0.01 ^e	3.01 ± 0.18 ^b	2.84 ± 0.14 ^c	3.82 ± 0.17 ^a	2.94 ± 0.11 ^c	2.21 ± 0.04 ^f	2.73 ± 0.03 ^d

TMA: Tortilla de maíz azul. TMB: Tortilla de maíz blanco. TMR: Tortilla de maíz rojo. TMAH: Tortilla de maíz azul con harina de moringa. TMBH: Tortilla de maíz blanco con harina de moringa. TMRH: Tortilla de maíz rojo con harina de moringa. TMACP: Tortilla de maíz azul con concentrado proteico de moringa. TMBCP: Tortilla de maíz blanco con concentrado proteico de moringa. TMRCP: Tortilla de maíz rojo con concentrado proteico de moringa. Valor medio calculado a partir de tres réplicas ± desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

3.5 Conclusiones capítulo III

La incorporación de *Moringa oleifera* a la formulación de tortillas de maíz criollo permitió mejorar de manera clara y diferenciada su perfil nutricional y funcional en comparación con las tortillas control. Las tortillas fortificadas con concentrado proteico de moringa presentaron los mayores incrementos en el contenido de proteína, superando consistentemente a las formulaciones tradicionales y a aquellas adicionadas con harina de hoja, lo que confirma la eficiencia del concentrado como estrategia para corregir la limitación proteica inherente al maíz. Por su parte, la adición de harina de hoja de moringa favoreció principalmente el aumento del contenido de fibra dietética total, tanto soluble como insoluble, sin comprometer de forma significativa la calidad tecnológica de las tortillas. Este comportamiento evidencia que la hoja completa aporta componentes estructurales capaces de integrarse a la matriz del alimento, contribuyendo a un perfil nutricional más balanceado respecto a las tortillas control.

En términos de compuestos bioactivos, ambas formas de moringa incrementaron de manera significativa el contenido de fenoles y flavonoides y mejoraron la capacidad antioxidante de las tortillas, reflejada en la reducción de los valores de IC₅₀ en los ensayos DPPH• y ABTS•⁺. Las tortillas fortificadas con concentrado proteico mostraron la mayor actividad antioxidante global, mientras que las formulaciones con harina de moringa mantuvieron un aporte relevante de antocianinas provenientes del maíz pigmentado.

Los resultados obtenidos confirman que la combinación de tortilla de maíz criollo con moringa, ya sea en forma de harina o de concentrado proteico, constituye una estrategia efectiva para desarrollar un alimento con mayor valor nutricional y potencial antioxidante respecto a las tortillas tradicionales, estableciendo una base sólida para su evaluación en modelos biológicos orientados a calidad proteica y efectos metabólicos.

3.6 Literatura citada

AACC. (2000). American Association of Cereal Chemists. Approved methods. 9a ed. St. Paul, MN.

Alkhudhayri, D.A., Osman, M.A., Alshammari, G.M., Al Maiman, S.A., Yahya, M.A. (2021). Moringa peregrina leaf extracts produce anti-obesity, hypoglycemic, anti-hyperlipidemic, and hepatoprotective effects on high-fat diet fed rats. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(6), 3333-3342.

Arámbula-Villa, G., Yáñez-Limón, J. M., & Figueroa-Cárdenas, J. D. (2001). Effect of maize kernel hardness on the physicochemical properties of masa and tortillas. *Journal of Cereal Science*, 34(3), 317–326.

Bressani, R. (1990). Protein quality of maize. *Food Reviews International*, 6(3), 379–401.<https://doi.org/10.1080/87559129009540870>

Bressani, R. (2008). Changes in the nutritive value of maize during tortilla preparation. *Food Reviews International*, 6(3), 343–356.<https://doi.org/10.1080/87559129009540884>

Cuevas-Martínez, D., et al. (2010). Effect of nixtamalization on tortilla quality. *Journal of Food Engineering*, 97(4), 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.11.007>

Cuevas-Martínez, D., Moreno-Ramos, C., Martínez-Manrique, E., Moreno-Martínez, E., Méndez-Albores, A. (2010). Nutrition and texture evaluation of maize-white common bean nixtamalized tortillas. *Interciencia*, 35(11), 828-832.

Fahey, J. W. (2005). Moringa oleifera: A review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties. Part 1. *Trees for Life Journal*, 1(5), 1–15.

FAO. (2013). Dietary protein quality evaluation in human nutrition. FAO Food and Nutrition Paper No. 92. Food and Agriculture Organization of the United Nations.<https://www.fao.org/3/i3124e/i3124e.pdf>

FAO/WHO. (2007). Protein and amino acid requirements in human nutrition. WHO Technical Report Series No. 935. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43411>

Gogoi, B. K., Yadav, D. N., & Singh, A. (2023). Effect of alkaline cooking on dietary fiber and nutritional quality of pigmented maize. *Food Chemistry Advances*, 2, 100176. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100176>

- Gopalakrishnan, L., Doriya, K., & Kumar, D. S. (2016). *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. *Food Science and Human Wellness*, 5(2), 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2016.04.001>
- Gómez-Aldapa, C. A., et al. (2016). Effect of fiber-rich ingredients on tortilla texture. *LWT – Food Science and Technology*, 65, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.060>
- Hernández-Uribe, J. P., Ramos-Gómez, M., Bello-Pérez, L. A., & Mora-Rochín, S. (2020). Nutritional and functional properties of tortillas from nixtamalized maize. *Journal of Cereal Science*, 93, 102970. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102970>
- Mabrouki, L., et al. (2020). Protective effect of *Moringa oleifera* leaf extract on metabolic disorders and oxidative stress in obese rats. *Journal of Food Biochemistry*, 44(7), e13262. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13262>
- Mabrouki, L., I. Rjeibi, J. Taleb, and L. Zourgui. (2020). Cardiac ameliorative effect of *Moringa oleifera* leaf extract in high-fat diet-induced obesity in rat model. *BioMed Res. Int.*, 2020, 6583603.
- Makkar, H. P. S., & Becker, K. (1996). Nutritional value and antinutritional components of whole and ethanol extracted *Moringa oleifera* leaves. *Animal Feed Science and Technology*, 63(1–4), 211–228. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(96\)01023-1](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)01023-1)
- Mbikay, M. (2012). Therapeutic potential of *Moringa oleifera* leaves in chronic hyperglycemia and dyslipidemia. *Frontiers in Pharmacology*, 3, 24. <https://doi.org/10.3389/fphar.2012.00024>
- Mora-Rochín, S., et al. (2010). Nutritional quality and antioxidant capacity of tortillas from pigmented maize. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(7), 699–705. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.03.003>
- Mora-Rochín, S., Gutiérrez-Uribe, J. A., Serna-Saldívar, S. O., Sánchez-Peña, P., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 502–508. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.08.010>
- Núñez-Sánchez, N., González-Ortiz, L., & Santiago-Ramos, D. (2020). Effect of chia seed addition on the nutritional and functional properties of corn tortillas. *LWT - Food Science and Technology*, 132, 109865.
- Olvera-Novoa, M. A., Orozco-Mena, E. L., Domínguez-Jiménez, P., & Olvera-López, J. (2016). Valor nutricional y funcional de tortillas de maíz enriquecidas con espirulina. *Agrociencia*, 50(2), 165–176.
- Olvera, J. L., Cárdenas, L., & Chávez, J. A. (2016). Nutritional improvement of corn tortillas by incorporation of *Spirulina* spp. *Journal of Food Science and Nutrition*, 4(2), 112–119.
- Palacios-Fonseca, A. J., Castro-Rosas, J., Gómez-Aldapa, C. A., Tovar-Benítez, T., Millán-Malo, B., & Hernández-Uribe, J. P. (2009). Effect of nixtamalization on the physicochemical properties of maize tortillas fortified with legumes. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 531–536. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.026>

- Rawel, H. M., Kroll, J., Hohl, U. C., & Rohn, S. (2001). Binding of selected phenolic compounds to proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(2), 651–659. <https://doi.org/10.1021/jf000867x>
- Salinas-Moreno, Y., Sánchez, J. J., Aguilar-Rangel, M. R., & Velázquez-Cardelas, G. A. (2013). Contenido de fibra dietética, soluble e insoluble, en razas mexicanas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 7–15. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/36-1/2a.pdf>
- Salinas-Moreno, Y., et al. (2018). Nutritional properties of nixtamalized maize flours from different colors of maize in the highland region of Mexico. *Cereal Chemistry*, 95(2), 178–185. DOI: 10.1094/CCHEM-07-17-0202-R.
- Serna-Saldivar, O.S., Tovar, A.R. (2015). The effect of isorhamnetin glycosides extracted from *Opuntia ficus-indica* in a mouse model of diet induced obesity. *Food Funct.*, 6(3), 805–815.
- Serna-Saldivar, O.S., Tovar, A.R. (2015). The effect of isorhamnetin glycosides extracted from *Opuntia ficus-indica* in a mouse model of diet induced obesity. *Food Funct.*, 6(3), 805–815.
- Randhir, R., & Shetty, K. (2007). Improved alpha-amylase and alpha-glucosidase inhibitory activities in fenugreek sprouts. *Journal of Food Biochemistry*, 31(4), 449–470.
- Sánchez-Machado, D. I., Núñez-Gastélum, J. A., Reyes-Moreno, C., Ramírez-Wong, B., & López-Cervantes, J. (2010). Nutritional quality of edible parts of *Moringa oleifera*. *Food Analytical Methods*, 3(3), 175–180. <https://doi.org/10.1007/s12161-009-9106-0>
- Teixeira, E. M. B., Carvalho, M. R. B., Neves, V. A., Silva, M. A., & Arantes-Pereira, L. (2014). Chemical characteristics and fractionation of proteins from *Moringa oleifera* Lam. leaves. *Food Chemistry*, 147, 51–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.135>
- Teixeira, E. M. B., et al. (2014). Chemical characteristics and fractionation of proteins from *Moringa oleifera* leaves. *Food Chemistry*, 147, 51–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.135>
- Teixeira, E. M. B., et al. (2014). Chemical characteristics and functional behavior of proteins from *Moringa oleifera* leaves. *Food Chemistry*, 147, 51–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.135>
- Young, V. R., & Pellett, P. L. (1994). Plant proteins in relation to human protein and amino acid nutrition. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 59(5 Suppl), 1203S–1212S <https://doi.org/10.1093/ajcn/59.5.1203S>
- Žilić, S., et al. (2012). Phenolic compounds and antioxidant activity of maize kernels and processed products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(20), 4949–4956. <https://doi.org/10.1021/jf300314a>
- Žilić, S., Serpen, A., Akilloğlu, G., Gökmen, V., & Vančetović, J. (2012). Phenolic compounds, carotenoids, anthocyanins, and antioxidant capacity of colored maize (*Zea mays*

L.) kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(5), 1224–1231.
<https://doi.org/10.1021/jf204367z>

Capítulo IV: Evaluación biológica en modelos de crecimiento y dieta hiperlipídica

4.1 Resumen

En este capítulo se evaluó la calidad biológica de la proteína y los efectos metabólicos del consumo de tortillas de maíz criollo enriquecidas con *Moringa oleifera* mediante modelos experimentales en ratas Wistar. El objetivo fue determinar si la mejora composicional observada en las tortillas fortificadas se traduce en un mayor aprovechamiento proteico y en efectos metabólicos medibles bajo condiciones controladas. Se emplearon dietas isoproteicas formuladas con tortillas control y tortillas enriquecidas con harina y concentrado proteico de moringa, comparadas con una dieta de referencia basada en caseína. Se evaluaron parámetros de crecimiento, consumo de alimento, relación de eficiencia proteica (PER) y digestibilidad aparente durante un periodo experimental controlado. En una segunda etapa, se utilizó un modelo de dieta hiperlipídica para analizar indicadores metabólicos, incluyendo glucosa sérica, triglicéridos, colesterol total, fracciones lipoproteicas, contenido lipídico hepático y excreción fecal de lípidos. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos. Las dietas con tortillas enriquecidas presentaron mayores valores de PER y digestibilidad aparente respecto a las tortillas elaboradas exclusivamente con maíz, evidenciando un mejor aprovechamiento proteico. En el modelo hiperlipídico, las tortillas enriquecidas contribuyeron a una reducción en triglicéridos séricos y en la acumulación de lípidos hepáticos en comparación con la dieta hiperlipídica control. Estos efectos se asociaron al perfil aminoacídico mejorado y al mayor contenido de fibra y compuestos bioactivos derivados de la incorporación de moringa.

4.2 Introducción

La calidad nutricional de una proteína no depende únicamente de su contenido cuantitativo, sino de su perfil de aminoácidos esenciales, su digestibilidad y su capacidad para ser utilizada eficientemente por el organismo para promover el crecimiento, el mantenimiento de los tejidos y el equilibrio metabólico. En este contexto, los cereales constituyen una fuente primaria de proteína para amplios sectores de la población mundial; sin embargo, presentan limitaciones bien documentadas en términos de calidad proteica, particularmente por su bajo contenido de lisina y triptófano, aminoácidos esenciales que condicionan su aprovechamiento biológico (Bressani, 1990; FAO/WHO, 2007). Estas limitaciones adquieren especial relevancia en poblaciones cuya dieta se basa de manera predominante en productos derivados del maíz, como ocurre en diversas regiones de México.

La tortilla de maíz, alimento central en la dieta tradicional mexicana, representa una fuente importante de energía, fibra dietética y micronutrientes; no obstante, su proteína mantiene las deficiencias inherentes al grano de origen. En capítulos previos de este estudio se demostró que la incorporación de harina de hoja de *Moringa oleifera* y, de manera más pronunciada, de su concentrado proteico, mejora de forma significativa el contenido total de proteína y corrige parcialmente el perfil de aminoácidos esenciales de las tortillas, particularmente en lisina y triptófano, sin comprometer sus características tecnológicas ni su estabilidad antioxidante. Sin embargo, la demostración de estas mejoras a nivel

composicional no es suficiente para establecer su impacto nutricional real, por lo que resulta indispensable evaluar la eficiencia con la que dicha proteína es digerida, absorbida y utilizada por el organismo.

Los modelos animales en ratas Wistar en crecimiento constituyen una herramienta ampliamente aceptada para la evaluación biológica de la calidad proteica de alimentos e ingredientes, ya que permiten integrar de manera funcional variables fisiológicas clave como la ganancia de peso corporal, el consumo de alimento y el balance nitrogenado. Dentro de estos modelos, la relación de eficiencia proteica (PER) ha sido empleada históricamente como un indicador directo de la capacidad de una proteína dietaria para sostener el crecimiento bajo condiciones controladas, expresando la ganancia de peso corporal por unidad de proteína consumida (Reeves et al., 1993; FAO/WHO, 2007). Este índice resulta particularmente útil para comparar fuentes proteicas de origen vegetal, donde diferencias en el perfil aminoacídico pueden traducirse en variaciones significativas en la utilización metabólica de la proteína, aun cuando el contenido total sea similar.

La digestibilidad aparente de la proteína constituye un parámetro complementario indispensable en la interpretación del PER, ya que permite estimar la fracción de proteína efectivamente absorbida a nivel intestinal. En matrices alimentarias complejas, como las tortillas de maíz fortificadas con ingredientes vegetales, la digestibilidad puede verse modulada por la presencia de fibra dietética, compuestos fenólicos y la estructura físico-química de la proteína, factores que influyen tanto en la acción de las enzimas digestivas como en la disponibilidad de aminoácidos esenciales (Serna-Saldívar, 2015). Por ello, la evaluación conjunta de PER y digestibilidad proporciona una visión más completa del valor nutricional de la proteína, evitando interpretaciones parciales basadas exclusivamente en la ganancia de peso o en la composición química del alimento.

En el presente estudio, la evaluación biológica fue diseñada bajo un esquema nutricional estrictamente controlado, en el cual las dietas experimentales fueron estandarizadas a un mismo nivel proteico, permitiendo atribuir las diferencias observadas en PER y digestibilidad exclusivamente a la calidad de la fuente proteica y no a variaciones en el aporte total de proteína o energía. La comparación entre una dieta de referencia basada en caseína, tortillas de maíz azul sin fortificación y tortillas adicionadas con concentrado proteico de *M. oleifera* permite analizar de manera directa el impacto del enriquecimiento proteico vegetal sobre el crecimiento y el aprovechamiento metabólico de la proteína dietaria, evitando sesgos asociados a la formulación de la dieta. De esta manera, la evaluación biológica desarrollada en este capítulo establece un vínculo funcional entre los cambios composicionales observados en las tortillas fortificadas y su respuesta fisiológica en un modelo de crecimiento, proporcionando evidencia experimental sobre la capacidad de estas formulaciones para mejorar la calidad proteica de un alimento básico de alto consumo.

Además de la calidad proteica, el impacto nutricional de un alimento reformulado debe evaluarse considerando su influencia sobre procesos metabólicos asociados al consumo habitual de dietas hipercalóricas, particularmente aquellos relacionados con el metabolismo de lípidos y carbohidratos. Se ha documentado ampliamente que la ingesta sostenida de dietas con alto contenido de grasas saturadas y colesterol promueve alteraciones metabólicas como hipertrigliceridemia, hipercolesterolemia, resistencia a la insulina y acumulación de lípidos en tejido hepático, condiciones que constituyen factores de riesgo para el desarrollo de

enfermedades crónicas no transmisibles (Grundy, 2016; WHO, 2020). La evaluación de alimentos fortificados bajo este tipo de modelos permite determinar si los beneficios observados a nivel composicional y nutricional se traducen en efectos fisiológicos medibles en condiciones metabólicamente desafiantes.

Diversos estudios han señalado que la fibra dietética y los compuestos fenólicos de origen vegetal desempeñan un papel relevante en la modulación del metabolismo lipídico y glucémico, mediante mecanismos que incluyen la disminución de la absorción intestinal de lípidos, el aumento de la excreción fecal de colesterol y ácidos biliares, la atenuación del estrés oxidativo y la regulación de rutas de señalización metabólica asociadas a la homeostasis de la glucosa (Anderson et al., 2009; Del Rio et al., 2013). En particular, se ha reportado que matrices alimentarias ricas en fibra y polifenoles pueden mejorar el perfil lipoproteico plasmático, reducir la acumulación de grasa hepática y contribuir a un mejor control glucémico en modelos animales alimentados con dietas hiperlipídicas (Slavin, 2013; González-Abuín et al., 2015).

Las hojas de *Moringa oleifera* han sido ampliamente estudiadas por su contenido de fibra dietética, flavonoides, ácidos fenólicos y otros compuestos bioactivos con potencial antioxidante y modulador del metabolismo. Evidencia experimental en modelos animales ha mostrado que la suplementación con moringa puede asociarse con reducciones en los niveles de colesterol total, triglicéridos y glucosa en sangre, así como con mejoras en marcadores de estrés oxidativo y daño hepático, particularmente bajo condiciones de dietas hipercalóricas o hiperlipídicas (Mbikay, 2012; Vergara-Jiménez et al., 2017). No obstante, gran parte de estos estudios han evaluado extractos o polvos de hoja de moringa de forma aislada, lo que limita la extrapolación de los resultados a matrices alimentarias complejas y de consumo habitual.

Es por esto que la tortilla de maíz fortificada con harina de hoja de *M. oleifera* representa una matriz de especial interés, ya que integra un alimento básico de alto consumo con componentes dietéticos capaces de influir en el metabolismo energético y lipídico. En capítulos previos de este trabajo se demostró que la adición de moringa incrementa de manera significativa el contenido de fibra dietética y compuestos fenólicos de las tortillas, manteniendo una composición nutricional balanceada y propiedades tecnológicas adecuadas. Sin embargo, resulta fundamental evaluar si estas características se traducen en efectos metabólicos medibles cuando el alimento es incorporado dentro de una dieta hiperlipídica formulada para inducir alteraciones metabólicas.

Por ello, en una segunda etapa experimental, el presente estudio emplea un modelo biológico de ratas Wistar alimentadas con dietas hipercalóricas e hiperlipídicas, formuladas bajo un esquema nutricional estrictamente controlado que asegura un contenido equivalente de proteína, energía y fibra dietética entre los diferentes grupos experimentales. La selección de tortillas de maíz rojo (TMR) y tortillas de maíz rojo adicionadas con harina de hoja de *Moringa oleifera* (TMRH) como matrices dietarias se fundamenta en los resultados obtenidos en los capítulos previos, donde estas formulaciones destacaron por presentar los mayores contenidos de fibra dietética y compuestos fenólicos totales en comparación con las tortillas elaboradas a partir de otras variedades de maíz y formulaciones evaluadas. Dado que tanto la fibra dietética como los compuestos fenólicos han sido ampliamente asociados con efectos hipolipemiantes, hipoglucemiantes y moduladores del metabolismo lipídico, su

incorporación dentro de una matriz alimentaria de consumo habitual representa un escenario particularmente relevante para la evaluación de respuestas metabólicas.

Este diseño experimental permite evaluar de manera específica el efecto de la sustitución parcial de la matriz dietaria por tortillas TMR y TMRH sobre parámetros bioquímicos relacionados con el metabolismo de lípidos y carbohidratos, incluyendo perfiles lipídicos séricos, glucosa en sangre, acumulación de lípidos a nivel hepático y excreción fecal de grasas, bajo condiciones de desafío metabólico inducidas por una dieta hiperlipídica. De esta manera, se busca determinar si las diferencias composicionales observadas en estas tortillas, particularmente en términos de fibra y compuestos fenólicos, se traducen en efectos fisiológicos medibles que contribuyan a atenuar las alteraciones metabólicas asociadas al consumo de dietas altas en grasa.

La integración de indicadores como triglicéridos, colesterol total, fracciones lipoproteicas (C-LDL y C-HDL), glucosa sérica, contenido lipídico hepático y lípidos fecales proporciona una evaluación integral de la respuesta metabólica al consumo de las tortillas experimentales. De esta manera, el presente capítulo articula dos aproximaciones complementarias —la evaluación de la calidad proteica y el análisis de efectos metabólicos— que permiten valorar de forma más completa el impacto nutricional de la reformulación de tortillas de maíz mediante la incorporación de *Moringa oleifera*, bajo condiciones que simulan escenarios dietarios relevantes para la salud pública.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Consideraciones éticas y animales experimentales

El manejo y cuidado de los animales de experimentación se realizó conforme a los lineamientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999 para el uso y cuidado de animales de laboratorio. El protocolo experimental fue evaluado y aprobado previamente por el comité de ética correspondiente.

Se utilizaron ratas macho de la cepa Wistar, destetadas, con una edad inicial de 21–22 días y un peso corporal homogéneo al inicio del estudio. Los animales se mantuvieron en condiciones controladas de bioterio, con una temperatura ambiente de 22 ± 2 °C y un ciclo luz–oscuridad de 12:12 h. Durante todo el periodo experimental, los animales tuvieron acceso ad libitum al alimento y al agua potable.

4.3.2 Diseño experimental y formulación de dietas para la evaluación de la calidad proteica

El estudio se diseñó para evaluar la calidad proteica de tortillas de maíz fortificadas mediante un modelo de crecimiento. Para ello, se formularon dietas experimentales isoproteicas, ajustadas a un contenido de proteína del 9 %, siguiendo los lineamientos de la dieta AIN-93 para estudios de crecimiento.

Los animales se distribuyeron aleatoriamente en tres grupos experimentales (n = 6 por grupo):

- **Grupo control de referencia (DR):** Dieta AIN-93 con caseína como fuente proteica.
- **Grupo tortilla control (TMA):** Dieta formulada con tortilla de maíz azul sin fortificación como fuente principal de proteína.
- **Grupo tortilla fortificada (TMACP):** Dieta formulada con tortilla de maíz azul adicionada con concentrado proteico de *Moringa oleifera* como fuente principal de proteína.



Figura 11. Rack de los modelos biológicos durante el experimento

Las dietas se formularon ajustando los componentes de carbohidratos y lípidos de acuerdo con la composición proximal de cada tratamiento, de manera que las diferencias observadas pudieran atribuirse exclusivamente a la calidad de la proteína dietaria.

Grupo I (sano): Dieta completa y equilibrada con 17 % de proteína, proveniente exclusivamente de caseína.

Grupo II (referencia): Dieta con restricción proteica, ajustada al 9 % de proteína de caseína.

Grupo III: Dieta con 9 % de proteína, cuya fuente proteica correspondió exclusivamente a tortilla de maíz azul (TMA).

Grupo IV: Dieta con 9 % de proteína, cuya fuente proteica correspondió exclusivamente a tortilla de maíz azul adicionada con concentrado proteico de *Moringa oleifera* (TMACP).

A continuación, en la Tabla 16 se muestra el análisis químico proximal de las tortillas desarrolladas y su contenido nutricional.

Tabla 17. Análisis de la composición nutricional de las tortillas desarrolladas.

Componente (%)	TMA	TMACP
Lípidos	2.65 ^b	2.98 ^a
Carbohidratos	77.83 ^a	74.21 ^b
Proteínas	10.03 ^b	12.55 ^a
Fibra dietética	7.95 ^b	8.4 ^a
Minerales	1.54 ^b	1.86 ^a
Total	100	100

TMA: Tortilla de maíz azul. TMACP: Tortilla de maíz azul con concentrado proteico de moringa.

En la Tabla 17 se muestra la formulación final de las dietas que se administrarán para los grupos de roedores en experimentación.

Tabla 18. Ingredientes para la formulación de las diferentes dietas.

INGREDIENTE (%)	D-I	D-II	D-V	D-VI
TMA	-	-	90	-
TMACP	-	-	-	72
Almidón	63.5	72.9	2.3	20
Aceite de soya	7	7	4.6	4.85
Caseína	20	10.6	-	-

Mezcla de minerales	3.5	3.5	2.1	2.16
Mezcla de vitaminas	1	1	1	1
Celulosa	5	5	-	-
TOTAL	100	100	100	100

TMA: Tortilla de maíz azul. TMACP: Tortilla de maíz azul con concentrado proteico de moringa.

4.3.2.1 Periodo experimental y monitoreo

El periodo experimental tuvo una duración total de 28 días. Durante este tiempo, se registró diariamente el consumo de alimento por animal y el peso corporal. Estos datos se utilizaron para evaluar la ganancia de peso y calcular los índices de eficiencia proteica.

4.3.2.2 Determinación de la relación de eficiencia proteica (PER)

La relación de eficiencia proteica (PER) se calculó como el cociente entre la ganancia de peso corporal (g) y la cantidad de proteína consumida (g) durante el periodo experimental, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$PER = \frac{\text{Ganancia de peso (g)}}{\text{Proteína consumida (g)}}$$

Este índice se empleó como un indicador funcional de la capacidad de la proteína dietaria para sostener el crecimiento bajo condiciones controladas.

4.3.2.3 Determinación de la digestibilidad aparente de la proteína

Para la evaluación de la digestibilidad aparente, se recolectaron las heces de los animales durante un periodo definido al final del experimento. Las muestras fecales se secaron, homogenizaron y se analizaron para determinar su contenido de nitrógeno mediante métodos estándar.

La digestibilidad aparente de la proteína se calculó utilizando la diferencia entre la proteína ingerida y la proteína excretada en heces, expresada como porcentaje respecto a la proteína consumida.

4.3.3 Diseño experimental para la evaluación de los efectos hipolipemiantes e hipoglucemiantes

La segunda etapa del estudio se desarrolló conforme a lo establecido en la **NOM-062-ZOO-1999** para el uso y cuidado de animales de laboratorio, así como a las recomendaciones internacionales de bienestar animal. El objetivo de esta fase fue evaluar los efectos hipolipemiantes e hipoglucemiantes de tortillas elaboradas a partir de maíz rojo, con y sin adición de harina de hoja de *Moringa oleifera*, empleando un modelo de ratas Wistar con alteraciones metabólicas inducidas mediante una dieta hiperlipídica.

Se utilizaron ratas macho Wistar de 12 semanas de edad, clínicamente sanas, con un peso corporal inicial aproximado de 250–300 g, provenientes del bioterio del Instituto de Neurobiología de la UNAM, campus Juriquilla, Querétaro, México. Los animales se alojaron en jaulas individuales de acero inoxidable con dimensiones de 24 × 18 × 18 cm, equipadas con rejillas superiores para comederos y bebederos y con charolas inferiores para la recolección de heces. Las charolas se limpiaron cada 24 h. Las condiciones ambientales se mantuvieron controladas, con una temperatura de 22 ± 2 °C, humedad relativa de 40–70 %, de 10 a 15 recambios de aire por hora y un ciclo de luz-oscuridad de 12 h. El suministro de agua y alimento fue *ad libitum*. Previo al inicio del experimento, los animales pasaron por un periodo de aclimatación de 7 días, durante el cual se evaluó su estado general y comportamiento.

Una vez concluida la aclimatación, los animales fueron asignados aleatoriamente a cuatro grupos experimentales, con seis ratas por grupo, de acuerdo con el tipo de dieta administrada:

- **Grupo D-I (control sano):** dieta estándar AIN-93.
- **Grupo D-II (control hiperlipídico):** dieta AIN-93 modificada con alto contenido de grasa para inducir alteraciones metabólicas.
- **Grupo D-III:** dieta hiperlipídica con inclusión de tortillas de maíz rojo (TMR).
- **Grupo D-IV:** dieta hiperlipídica con inclusión de tortillas de maíz rojo adicionadas con 5 % de harina de hoja de *Moringa oleifera* (TMRH).

Las tortillas utilizadas en esta etapa fueron elaboradas bajo condiciones controladas, asegurando homogeneidad en su composición. Su caracterización bromatológica se realizó mediante análisis proximal mostrados en la Tabla 19 conforme a métodos oficiales (AOAC, 2016), y se consideró para la formulación de las dietas experimentales.

Tabla 19. Análisis de la composición nutricional de las tortillas desarrolladas

Componente (%)	TMR	TMRH
Lípidos	2	2.2
Carbohidratos	79.96	75.15
Proteínas	7.9	9.54

Fibra dietética	8.3	10.91
Minerales	1.56	2.2
Total	100	100

TMR: Tortilla de maíz rojo. TMRH: Tortilla de maíz rojo con harina de *Moringa oleifera*.

Las dietas fueron formuladas de manera que todas presentaran un contenido equivalente de proteína, energía y fibra dietética, con el fin de que las diferencias observadas en los parámetros metabólicos pudieran atribuirse a la matriz alimentaria y a la presencia de compuestos bioactivos, y no a variaciones en el aporte nutricional total (Tabla 20). La composición teórica final de las dietas se ajustó conforme a este criterio, manteniendo un contenido de fibra dietética del 5 % en todos los grupos mostrado en la Tabla 21, condición establecida como base para la evaluación de los efectos hipolipemiantes e hipoglucemiantes.

Tabla 20. Ingredientes para la formulación de las diferentes dietas

Ingrediente (%)	D-I	D-II	D-III	D-IV
Tortilla de maíz rojo	-	-	59	-
Tortilla de maíz rojo + harina de <i>M. oleifera</i>	-	-	-	50
Almidón	71.5	60.5	14.0	22.9
Aceite de soya	4.0	4.0	2.77	2.90
Caseína	15.0	15.0	9.7	9.7
Mezcla de minerales	3.5	3.5	2.6	2.4
Mezcla de vitaminas	1.0	1.0	1.0	1.0
Celulosa	5	5	0.0	0.0
Aceite de coco	-	10.0	10.0	10.0
Colesterol	-	1	1	1
TOTAL	100	100	100.0	100.0

Tabla 21. Bromatológico teórico final de las dietas en experimentación

Componente (%)	D-I	D-II	D-III	D-IV
Lípidos	4.0	15.0	15.0	15.0
Carbohidratos	73.8	62.8	62.8	62.8
Proteínas	12.7	12.7	12.7	12.7
Fibra dietética	5.0	5.0	5.0	5.0
Minerales	3.5	3.5	3.5	3.5
Vitaminas	1.0	1.0	1.0	1.0
Total	100	100	100.0	100.0
Kcal	387.0	442.0	442.18	441.80

4.3.3.1 Periodo experimental y monitoreo

El periodo experimental tuvo una duración de 21 días. Durante este tiempo se registraron diariamente el peso corporal, el consumo de alimento y el estado físico general de cada animal, incluyendo hidratación, apariencia del pelaje, movilidad y posibles signos de dolor o estrés, de acuerdo con las pautas establecidas por la normatividad vigente.

4.3.3.2 Análisis realizados para determinar el efecto metabólico

Al término del periodo experimental, los animales fueron anestesiados mediante la administración intraperitoneal de pentobarbital sódico (50 mg/kg) hasta comprobar un estado profundo de inconsciencia, y posteriormente se realizó la eutanasia por exanguinación mediante punción cardíaca. La sangre recolectada se procesó para la obtención de suero, el cual se utilizó para la determinación de triglicéridos, colesterol total, fracciones lipoproteicas (C-HDL y C-LDL) y glucosa sérica. Los análisis bioquímicos se realizaron en el Laboratorio CEPACVET, ubicado en Morelia, Michoacán, México.

Adicionalmente, se recolectó tejido hepático para la determinación de humedad y contenido de lípidos totales, siguiendo métodos validados (AOAC, 2016). Estos parámetros permitieron evaluar de manera integral el efecto de las tortillas experimentales sobre el metabolismo lipídico, tanto a nivel sistémico como hepático.

Durante todo el protocolo se dio seguimiento continuo al bienestar de los animales. En caso de presentarse signos evidentes de sufrimiento, deterioro progresivo del estado general o condición moribunda, se procedió al sacrificio humanitario mediante anestesia profunda seguida de una sobredosis de pentobarbital sódico (≥ 150 mg/kg, vía intraperitoneal), conforme a la NOM-062-ZOO-1999 y a las guías de la AVMA (2023). Las muestras biológicas y residuos generados durante el estudio fueron gestionados de acuerdo con la

NOM-087-ECOL-SSA1-2002, que regula el manejo de residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI). El personal involucrado utilizó equipo de protección básico, y la disposición final de los residuos se realizó a través de un proveedor autorizado por la Secretaría Administrativa de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH.

4.3.4 Análisis estadístico

Los resultados se expresan como media $\pm$ desviación estándar ($n = 5$). Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey, utilizando un nivel de significancia de $p \leq 0.05$ para detectar diferencias significativas entre tratamientos. El análisis estadístico se realizó utilizando el software RStudio®.

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Evaluación biológica de la calidad proteica de las tortillas experimentales

La evaluación biológica permitió analizar de manera integral el efecto de diferentes fuentes proteicas sobre el crecimiento, la eficiencia proteica y la digestibilidad aparente en ratas en crecimiento. Los resultados resumidos en la Tabla 22 evidencian diferencias claras entre los grupos experimentales, atribuibles tanto a la cantidad como a la calidad y disponibilidad metabólica de la proteína dietaria.

El grupo normoproteico (Grupo I), alimentado con una dieta formulada al 17 % de proteína a partir de caseína, presentó la mayor ganancia de peso (221.65 ± 44.99 g) y un consumo elevado de alimento (653.78 ± 27.76 g), valores consistentes con un aporte proteico adecuado para cubrir los requerimientos de crecimiento. El PER obtenido (2.03 ± 0.09) se encuentra dentro del rango esperado para dietas de referencia balanceadas y resulta ligeramente inferior al observado en dietas con restricción proteica moderada, fenómeno ampliamente documentado y asociado a una menor eficiencia relativa cuando el aporte de proteína no es limitante (Reeves et al., 1993).

Bajo condiciones de restricción proteica controlada, el Grupo II, que recibió una dieta con 9 % de proteína proveniente exclusivamente de caseína, mostró una ganancia de peso intermedia (108.53 ± 17.06 g), pero registró el PER más alto del estudio (2.48 ± 0.16). Este comportamiento es característico de dietas con restricción proteica moderada, donde una proteína de alta calidad es utilizada con mayor eficiencia metabólica, incrementando el índice PER aun cuando la ganancia absoluta de peso sea menor (Reeves et al., 1993; Martínez-Flores et al., 2002). La digestibilidad aparente observada en este grupo (87.32 ± 3.12 %) fue inferior a la del grupo normoproteico, aunque se mantuvo en rangos elevados, coherentes con la alta digestibilidad intrínseca de la caseína.

Cuando la proteína dietaria provino exclusivamente de la tortilla control de maíz azul (Grupo III), la ganancia de peso fue considerablemente menor (28.73 ± 7.84 g), acompañada de un PER significativamente reducido (0.86 ± 0.11). Estos resultados reflejan las limitaciones nutricionales propias de la proteína del maíz, particularmente su deficiencia en aminoácidos esenciales como lisina y triptófano, así como la menor digestibilidad asociada

a la matriz cereal, la presencia de fibra insoluble y la interacción con compuestos fenólicos ligados (Serna-Saldívar, 2015; FAO/WHO, 2013). La digestibilidad aparente de este grupo (73.18 ± 2.91 %) confirma una menor fracción de proteína absorbida, en concordancia con reportes previos para dietas basadas en cereales no suplementados (Martínez-Flores et al., 2002; Shiriki et al., 2015).

La incorporación del concentrado proteico de *Moringa oleifera* en las tortillas de maíz azul (Grupo IV, TMACP) produjo una mejora evidente respecto al grupo control de tortilla, reflejada en una mayor ganancia de peso (32.73 ± 4.45 g), un incremento en el PER (0.98 ± 0.10) y una digestibilidad aparente superior (83.07 ± 2.40 %). Aunque estos valores no alcanzaron los observados en los grupos con caseína, la tendencia confirma que la adición del concentrado proteico contribuyó a mejorar la calidad nutricional de la proteína del maíz.

Esta mejora puede interpretarse a la luz de los cambios observados en el perfil de aminoácidos de las tortillas tras la incorporación del concentrado proteico. Como se documentó previamente en el Capítulo III, las tortillas TMACP presentaron incrementos consistentes en aminoácidos esenciales limitantes del maíz, particularmente lisina, triptófano y treonina, en comparación con la tortilla control (TMA). Estos aminoácidos son determinantes para la síntesis proteica corporal y el crecimiento, y su deficiencia ha sido ampliamente reconocida como el principal factor que restringe el valor biológico de la proteína del maíz (Bressani, 2008; FAO/WHO, 2013). La mejor complementación aminoacídica redujo parcialmente el desbalance entre aminoácidos esenciales y no esenciales, reflejándose en el aumento del PER y en la mayor digestibilidad aparente observada.

El papel de la lisina resulta particularmente relevante, ya que este aminoácido suele ser el primero en limitar la utilización metabólica de proteínas de cereales. Estudios clásicos y contemporáneos han demostrado que incluso incrementos modestos en su contenido o disponibilidad pueden traducirse en mejoras apreciables en la eficiencia proteica medida por PER, aun cuando la fuente principal continúe siendo un cereal (Bressani, 2008; Serna-Saldívar, 2015). En este contexto, el concentrado proteico de moringa actuó como un complemento funcional eficaz, capaz de mejorar la calidad global de la proteína dietaria sin modificar de manera sustancial la matriz alimentaria base.

Antecedentes experimentales respaldan este comportamiento. Martínez-Flores et al. (2002) reportaron incrementos consistentes en PER y digestibilidad al complementar dietas de maíz con proteínas vegetales de mayor calidad, mientras que Shiriki et al. (2015) observaron valores de PER entre 0.9 y 1.2 en dietas cereal-leguminosa, destacando que la magnitud de la mejora depende tanto del perfil aminoacídico como de la fracción de proteína realmente disponible para absorción. Estos rangos coinciden estrechamente con los valores obtenidos en el presente estudio para el grupo TMACP.

Por otro lado, se ha documentado que mejoras más pronunciadas en PER, con valores superiores a 1.5, suelen alcanzarse cuando se emplean proteínas vegetales altamente purificadas o combinaciones cereal-leguminosa formuladas en proporciones óptimas (Mensa-Wilmot et al., 2001; FAO/WHO, 2013). Las diferencias respecto a los resultados aquí observados pueden explicarse por factores como el grado de purificación del ingrediente proteico, la proporción de sustitución aplicada, la presencia de fibra dietaria y compuestos

fenólicos, así como por la estructura física y complejidad de la matriz alimentaria. En el caso de las tortillas TMAP, la conservación de una matriz rica en carbohidratos complejos y fibra, aunque ventajosa desde una perspectiva funcional, puede limitar parcialmente la digestibilidad y la velocidad de absorción de los aminoácidos en comparación con dietas experimentales más refinadas.

Aun así, la digestibilidad observada en el grupo TMAP sugiere que el concentrado proteico de *Moringa oleifera* presenta una biodisponibilidad superior a la de la proteína del maíz nixtamalizado por sí sola, probablemente asociada a la concentración de fracciones proteicas solubles y a la reducción relativa de fibra insoluble durante su proceso de obtención. En conjunto, estos resultados confirman que la incorporación estratégica de proteínas vegetales puede generar mejoras modestas, pero biológicamente relevantes en indicadores como el PER y la digestibilidad, incluso cuando el alimento final mantiene la complejidad estructural propia de productos tradicionales a base de cereales.

Tabla 22. Resultados de estudio en modelo biológico del PER y digestibilidad

Gru po	Peso ganado (g)	Alimento consumido (g)	PER	Digestibilidad aparente (%)
I	221.65 ± 44.99 ^a	653.78 ± 27.76 ^a	2.03 ± 0.09 ^b	93.65 ± 1.10 ^a
II	108.53 ± 17.06 ^b	341.65 ± 26.36 ^c	2.48 ± 0.16 ^a	87.32 ± 3.12 ^b
III	28.73 ± 7.84 ^d	341.65 ± 26.36 ^c	0.86 ± 0.11 ^c	73.18 ± 2.91 ^c
IV	32.73 ± 4.45 ^c	384.30 ± 14.13 ^b	0.98 ± 0.10 ^c	83.07 ± 2.40 ^b

Los datos que se presentan son el promedio de las mediciones ± desviación estándar. N=5. Diferentes letras en la misma columna indican diferencias estadísticas con una significancia de p<0.05.

Los resultados evidencian que, bajo condiciones de restricción proteica, la fuente de proteína es un factor determinante en el aprovechamiento metabólico, y que la suplementación del maíz con ingredientes vegetales ricos en aminoácidos esenciales puede mejorar de manera tangible, aunque parcial, los indicadores biológicos de calidad proteica. Este comportamiento respalda el uso de indicadores como PER y digestibilidad aparente como herramientas sensibles para detectar mejoras funcionales en alimentos tradicionales reformulados, particularmente aquellos destinados a poblaciones con acceso limitado a proteínas de origen animal (FAO/WHO, 2013).

4.4.2 Evaluación de efecto hipolipemiante e hipoglucemiante

La ganancia de peso corporal y el consumo diario de alimento de los animales en experimentación se muestran en la Tabla X. Al inicio del periodo experimental, no se observaron diferencias significativas en el peso corporal entre los grupos ($p > 0.05$), lo que indica una asignación homogénea de los animales y permite atribuir los cambios observados durante el estudio a los efectos de las dietas experimentales.

Durante el periodo de intervención, el consumo diario de alimento fue similar entre todos los grupos (24.11–26.09 g/día), sin diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$). Este resultado es relevante, ya que sugiere que las dietas hiperlipídicas formuladas con tortillas de maíz rojo (G3) y tortillas de maíz rojo adicionadas con harina de *Moringa oleifera* (G4) no indujeron cambios en la ingesta voluntaria de alimento respecto al grupo control sano (G1) ni al grupo hiperlipídico (G2). La ausencia de diferencias en el consumo permite interpretar los efectos metabólicos observados posteriormente como consecuencia de la composición cualitativa de las dietas y no de variaciones en la cantidad de alimento ingerido.

En cuanto a la ganancia de peso, aunque no se detectaron diferencias estadísticas entre los grupos ($p > 0.05$), se observó una tendencia a mayores incrementos en los animales alimentados con dietas hiperlipídicas (G2–G4) en comparación con el grupo control estándar (G1), comportamiento consistente con lo reportado para modelos experimentales sometidos a dietas ricas en grasa (Grundy, 2016; WHO, 2020). Dentro de los grupos hiperlipídicos, la inclusión de tortillas de maíz rojo con y sin harina de *M. oleifera* mantuvo ganancias de peso comparables al grupo hiperlipídico, lo cual resulta metodológicamente favorable para el análisis de los parámetros metabólicos subsecuentes.

Tabla 23. Ganancia de peso y alimento consumido de los animales en experimentación.

Grupo	Peso inicial (g)	Ganancia de peso (g)	Alimento consumido por día (g)
G1	352.66±12.02 ^a	49.42±8.15 ^a	26.09±1.29 ^a
G2	358±24.44 ^a	68.12±19.47 ^a	25.62±2.27 ^a
G3	365.36±26.37 ^a	75.32±18.90 ^a	24.11±2.45 ^a
G4	363.30±18.45 ^a	62.08±23.49 ^a	24.32±2.87 ^a

Los datos que se presentan son el promedio de las mediciones $\pm$ desviación estándar. N=5. Diferentes letras en la misma columna indican diferencias estadísticas con una significancia de $p < 0.05$.

La evaluación del perfil metabólico en sangre constituye un aspecto central para caracterizar el impacto de las dietas hiperlipídicas y de la inclusión de tortillas fortificadas

con harina de *Moringa oleifera* sobre la homeostasis de glucosa y lípidos. En la Tabla 24 se observan claras tendencias asociadas al patrón dietario.

Los niveles de glucosa sérica fueron más altos en el grupo sometido a dieta hiperlipídica (G2) comparado con el grupo control (G1), lo cual es consistente con la literatura que describe que dietas ricas en grasa y colesterol tienden a aumentar la glucemia, incluso sin cambios drásticos en el peso corporal en modelos animales de corto plazo (Kobi et al., 2023; Di Majo et al., 2022). La elevación de glucosa en G2 puede reflejar una perturbación del metabolismo de carbohidratos inducida por la alta proporción de grasas, un fenómeno vinculado también con resistencia a la insulina en modelos experimentales (Cunha et al., 2021; Kobi et al., 2023). Tanto G3 como G4 mostraron valores intermedios de glucosa, sin diferencias significativas respecto a G1 y G2, sugiriendo un posible efecto modulador de la matriz alimentaria (fibra y compuestos bioactivos) sobre la respuesta glucémica, aunque no significativamente protector bajo las condiciones del estudio.

Los triglicéridos séricos presentaron un patrón distintivo: el grupo hiperlipídico (G2) presentó valores más elevados comparados con el control y con los grupos que recibieron tortillas (G3, G4), siendo el grupo con tortilla fortificada (G4) el que mostró la menor concentración de triglicéridos. Este comportamiento coincide con numerosos estudios que señalan que dietas altas en grasas elevan los triglicéridos plasmáticos, mientras que dietas con mayor contenido de fibra y compuestos fenólicos se asocian a una reducción de estas fracciones lipídicas (Sánchez-Muniz, 2012; Anderson et al., 1994; Bakr et al., 2023). El efecto reductor observado en G4 sugiere que los componentes de la harina de *Moringa oleifera* podrían contribuir a disminuir la concentración de triglicéridos, lo cual es consistente con reportes donde dietas con alto contenido de fibra soluble modulan positivamente los lípidos plasmáticos (Sánchez-Muniz, 2012; Linkon et al., 2024).

En relación con el colesterol total, G2 presentó niveles superiores al grupo control, como se esperaría en un modelo hiperlipídico (Cunha et al., 2021; Di Majo et al., 2022). Los grupos G3 y G4 mostraron valores intermedios, sin alcanzar las elevaciones del grupo hiperlipídico puro, lo cual puede indicar un grado de mitigación de las alteraciones lipídicas promovidas por la inclusión de tortillas (con o sin moringa). Esta tendencia es congruente con estudios donde ingredientes ricos en fibra y compuestos antioxidantes ayudan a regular el metabolismo del colesterol, posiblemente mediante la reducción de la absorción intestinal y el aumento de la excreción fecal de ácidos biliares (Sánchez-Muniz, 2012; Anderson et al., 1994; Linkon et al., 2024).

Finalmente, los niveles de HDL-colesterol reflejaron resultados interesantes: el grupo hiperlipídico (G2) mostró una tendencia a menores valores de HDL comparado con el control, aunque sin diferencias estadísticamente robustas, situación documentada previamente donde dietas altas en grasa pueden deprimir la fracción protectora de HDL (Di Majo et al., 2022; Kobi et al., 2023). Los grupos G3 y G4 presentaron niveles de HDL comparables al control (G1), destacando especialmente G4, lo que sugiere que la matriz alimentaria rica en fibra dietética y compuestos fenólicos de la tortilla con moringa podría preservar o incluso favorecer la fracción de lipoproteínas de alta densidad, lo cual ha sido reportado en dietas enriquecidas con fibra y polisacáridos (Sánchez-Muniz, 2012; Linkon et al., 2024).

Tabla 24. Parámetros sanguíneos de los animales en experimentación

Grupo	Glucosa (mg/dL)	Triglicéridos (mg/dL)	Colesterol (mg/dL)	HDL- Colesterol (mg/dL)
G1	133.72±4.99 ^b	63.69±34.44 ^{a,b}	56.04±11.76 ^b	47.40±10.71 ^a
G2	167.76±23.03 ^a	80.98±42.20 ^a	77.30±17.91 ^a	30.40±4.33 ^a
G3	149.76±11.86 ^{a,b}	45.10±12.03 ^{a,b}	62.60±5.74 ^{a,b}	30.20±4.65 ^a
G4	153.48±15.50 ^{a,b}	25.62±12.87 ^b	64.80±6.88 ^{a,b}	46.90±26.48 ^a

Los datos que se presentan son el promedio de las mediciones $\pm$ desviación estándar. N=5. Diferentes letras en la misma columna indican diferencias estadísticas con una significancia de $p < 0.05$.

Estos resultados sugieren que la dieta hiperlipídica inducida produjo alteraciones típicas del metabolismo de lípidos y carbohidratos, como elevación de glucosa y colesterol total, así como una tendencia a disminuir HDL. La inclusión de tortillas, y en particular de tortillas fortificadas con *Moringa oleifera*, mostró una tendencia moduladora sobre estas respuestas metabólicas adversas, especialmente en la reducción de triglicéridos y en la conservación de niveles de HDL, lo cual es consistente con mecanismos fisiológicos descritos para dietas ricas en fibra dietética y compuestos fenólicos que pueden influir en la absorción intestinal de lípidos y en la síntesis hepática de lipoproteínas (Anderson, J. W (2009); Anderson et al., 1994; Bakr et al., 2023). Esta evidencia respalda la hipótesis de que los componentes bioactivos de la moringa, integrados en una matriz alimentaria consumida regularmente como la tortilla de maíz, pueden atenuar parcialmente la dislipidemia inducida por dietas hiperlipídicas.

Los cambios observados en los parámetros sanguíneos reflejan alteraciones sistémicas en el metabolismo de lípidos y carbohidratos; sin embargo, dichas modificaciones metabólicas se originan y consolidan principalmente a nivel hepático, órgano clave en la regulación de la homeostasis energética. El hígado desempeña un papel central en la captación, síntesis, oxidación y almacenamiento de lípidos, por lo que la evaluación de su peso, contenido de humedad y acumulación de lípidos permite profundizar en los mecanismos fisiológicos subyacentes a las alteraciones plasmáticas observadas. El análisis de los parámetros hepáticos proporciona evidencia directa sobre el grado de esteatosis inducida por las dietas hiperlipídicas y sobre la capacidad de las tortillas experimentales, particularmente aquellas fortificadas con *Moringa oleifera*, para modular el contenido lipídico a nivel tisular. En la Tabla 25 se presenta los resultados de los análisis realizados a dichos órganos.

El peso del hígado mostró incrementos significativos en los grupos sometidos a dietas hiperlipídicas (G2, G3 y G4) en comparación con el grupo control (G1), lo cual es consistente con el desarrollo de hepatomegalia asociada a la acumulación de lípidos en modelos experimentales de sobrecarga grasa. Diversos estudios han documentado que dietas altas en

grasas saturadas y colesterol promueven un aumento del peso hepático como consecuencia de la acumulación de triglicéridos, colesterol y otros lípidos neutros dentro de los hepatocitos, fenómeno característico de la esteatosis hepática inducida por la dieta (Samuel & Shulman, 2018; Softic et al., 2016; Ipsen et al., 2018). La ausencia de diferencias significativas en el peso hepático entre los grupos hiperlipídicos indica que el aumento del tamaño del órgano estuvo determinado principalmente por el consumo de la dieta alta en grasa, mientras que las diferencias observadas en el contenido lipídico y la humedad hepática reflejan un efecto específico de la composición de las tortillas sobre la acumulación de grasa intrahepática.

En contraste, el contenido de humedad hepática presentó diferencias marcadas entre los grupos. El grupo hiperlipídico (G2) mostró el menor porcentaje de humedad, lo cual se asocia típicamente con una mayor sustitución del contenido acuoso por lípidos acumulados en el tejido hepático. Estudios previos han señalado que la disminución de la fracción acuosa del hígado es un indicador indirecto del grado de infiltración grasa y de daño metabólico inducido por dietas altas en lípidos (Ipsen et al., 2018; Begriche et al., 2013). Los grupos G3 y G4 presentaron valores intermedios de humedad, significativamente mayores que G2, lo que sugiere una menor severidad de la acumulación lipídica hepática cuando la dieta hiperlipídica incorpora tortillas como parte de la matriz alimentaria.

El contenido de lípidos en hígado evidenció el efecto más claro del tratamiento dietario. El grupo G2 presentó el mayor porcentaje de lípidos hepáticos, confirmando el establecimiento de un estado de esteatosis hepática inducida por la dieta hiperlipídica. Este resultado concuerda ampliamente con modelos animales en los que la suplementación con grasa y colesterol conduce a un aumento pronunciado de lípidos hepáticos, acompañado de alteraciones en el metabolismo de ácidos grasos y lipoproteínas (Samuel & Shulman, 2018; Softic et al., 2016). En contraste, los grupos que consumieron tortillas (G3 y G4) mostraron una reducción significativa en el contenido de lípidos hepáticos, siendo el grupo G4 el que presentó el menor porcentaje entre las dietas hiperlipídicas.

La reducción observada en G3 sugiere que la matriz de la tortilla de maíz rojo, rica en fibra dietética y compuestos fenólicos, puede atenuar parcialmente la acumulación lipídica hepática. Estudios previos han demostrado que los polifenoles presentes en maíces pigmentados pueden modular la expresión de genes relacionados con la lipogénesis hepática y favorecer la oxidación de ácidos grasos, reduciendo la acumulación de triglicéridos en el hígado (Mora-Rochín et al., 2010; López-Martínez et al., 2009; Santiago-Ramos et al., 2018). Asimismo, la fibra dietética puede disminuir la absorción intestinal de lípidos y colesterol, contribuyendo indirectamente a una menor carga lipídica hepática (Anderson et al., 2009; Slavin, 2013).

El efecto más pronunciado observado en el grupo G4 puede atribuirse a la incorporación de harina de hoja de *Moringa oleifera*, la cual incrementó de manera significativa el contenido de fibra dietética y compuestos fenólicos de la tortilla. Diversos estudios han reportado que la suplementación con moringa en modelos animales sometidos a dietas hiperlipídicas reduce la acumulación de lípidos hepáticos, mejora el perfil antioxidante y atenúa el daño hepático, posiblemente mediante la inhibición de la lipogénesis de novo y la activación de rutas de oxidación de ácidos grasos (Mbikay, 2012; Vergara-Jiménez et al., 2017; Kou et al., 2018). Además, los flavonoides y ácidos fenólicos presentes en la moringa

han sido asociados con la regulación de factores de transcripción como SREBP-1c y PPAR α , claves en el control del metabolismo lipídico hepático (Mbikay, 2012; Kim et al., 2017).

Tabla 25. Parámetros de peso, humedad y lípidos en hígado

Grupo	Peso de Hígado (g)	Humedad en hígado (%)	Lípidos en hígado (%)
G1	12.90 $\pm$ 1.45 ^a	70.15 $\pm$ 0.43 ^a	3.75 $\pm$ 0.15 ^d
G2	17.48 $\pm$ 1.96 ^b	54.46 $\pm$ 1.54 ^c	23.75 $\pm$ 0.66 ^a
G3	17.75 $\pm$ 1.09 ^b	59.19 $\pm$ 0.83 ^b	18.28 $\pm$ 0.11 ^b
G4	17.52 $\pm$ 0.61 ^b	60.22 $\pm$ 1.47 ^b	16.20 $\pm$ 0.42 ^c

Los datos que se presentan son el promedio de las mediciones $\pm$ desviación estándar. N=5. Diferentes letras en la misma columna indican diferencias estadísticas con una significancia de $p < 0.05$.

Los resultados hepáticos complementan y refuerzan los hallazgos observados en los parámetros sanguíneos, mostrando que la inclusión de tortillas de maíz rojo y, de manera más evidente, de tortillas fortificadas con *Moringa oleifera*, contribuye a atenuar la acumulación lipídica hepática inducida por una dieta hiperlipídica. Estos efectos sugieren que la matriz alimentaria desarrollada no solo modula marcadores plasmáticos, sino que ejerce un impacto directo sobre el metabolismo hepático de lípidos, aspecto clave en la prevención de alteraciones metabólicas asociadas al consumo prolongado de dietas altas en grasa.

4.5 Conclusiones capítulo IV

Los resultados obtenidos en la evaluación biológica confirman que la calidad de la proteína dietaria depende no solo de su concentración, sino de manera determinante de su perfil aminoacídico y de su digestibilidad, factores que influyen directamente en la ganancia de peso y en la eficiencia de utilización proteica en ratas en crecimiento. Las tortillas elaboradas exclusivamente con maíz azul mostraron una baja eficiencia proteica y una digestibilidad reducida, evidenciando las limitaciones nutricionales inherentes a la proteína del maíz cuando se consume como única fuente, particularmente por su deficiencia en aminoácidos esenciales como lisina y triptófano. Estos resultados confirman que, aun cuando el maíz aporta energía suficiente, su fracción proteica no es adecuada por sí sola para sostener un crecimiento óptimo.

La adición de concentrado proteico de *Moringa oleifera* a las tortillas de maíz azul permitió una mejora significativa en los indicadores de calidad proteica, reflejada en un

aumento del índice de eficiencia proteica y de la digestibilidad aparente en comparación con la tortilla control. Este efecto sugiere que la moringa actúa como un ingrediente complementario eficaz, capaz de enriquecer el perfil aminoacídico del maíz y de aumentar la fracción de proteína metabólicamente disponible. Si bien las dietas experimentales no alcanzaron los valores observados con proteínas de referencia como la caseína, la mejora observada indica que la combinación de maíz nixtamalizado con concentrado proteico vegetal permite reducir de manera sustancial las limitaciones nutricionales asociadas a alimentos tradicionales basados en cereales.

En una segunda etapa del estudio, la evaluación metabólica en un modelo de dieta hiperlipídica permitió ampliar el análisis del impacto nutricional de las tortillas reformuladas más allá de la calidad proteica. Los resultados obtenidos evidencian que la incorporación de tortillas de maíz rojo, particularmente aquellas adicionadas con harina de hoja de *Moringa oleifera*, se asocia con una atenuación de alteraciones metabólicas inducidas por la dieta, reflejada principalmente en una reducción de los niveles de triglicéridos séricos y de la acumulación de lípidos hepáticos, así como en una preservación parcial del contenido de humedad del tejido hepático. Estos efectos sugieren una modulación favorable del metabolismo lipídico bajo condiciones de desafío metabólico.

De manera conjunta, los hallazgos de ambas etapas indican que la reformulación de tortillas de maíz mediante la incorporación estratégica de *Moringa oleifera* no solo mejora la calidad biológica de la proteína, sino que también puede contribuir a mitigar alteraciones metabólicas asociadas al consumo de dietas altas en grasa, posiblemente a través del efecto combinado de una proteína de mejor calidad, un mayor contenido de fibra dietética y la presencia de compuestos fenólicos bioactivos. En este sentido, la tortilla fortificada se perfila como una matriz alimentaria de interés para el desarrollo de estrategias nutricionales orientadas a mejorar la calidad de la dieta en contextos donde el maíz constituye un alimento básico de alto consumo.

4.6 Literatura citada

Anderson, J. W., Baird, P., Davis, R. H., Ferreri, S., Knudtson, M., Koraym, A., Waters, V., & Williams, C. L. (2009). Health benefits of dietary fiber. *Nutrition Reviews*, 67(4), 188–205. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2009.00189.x>

Anderson JW, Jones AE, Riddell-Mason S. Ten different dietary fibers have significantly different effects on serum and liver lipids of cholesterol-fed rats. *J Nutr*. 1994 Jan;124(1):78-83. doi: 10.1093/jn/124.1.78. PMID: 8283297.

Bakr, A. F., et al. (2023). Soluble dietary fibers as antihyperlipidemic agents. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01121>

Begrache, K., et al. (2013). Mitochondrial dysfunction in nonalcoholic fatty liver disease. *Journal of Hepatology*, 58(1), 89–97.

Bressani, R. (1990). Protein quality of maize. *Food Reviews International*, 6(3), 379–401. <https://doi.org/10.1080/87559129009540870>

Bressani, R. (2008). Changes in the nutritive value of maize during tortilla preparation. *Food Reviews International*, 6(3), 343–356. <https://doi.org/10.1080/87559129009540884>

Cunha LF, Ongaratto MA, Endres M, Barschak AG. Modelling hypercholesterolaemia in rats using high cholesterol diet. *Int J Exp Pathol*. 2021 Apr;102(2):74-79. doi: 10.1111/iep.12387. Epub 2021 Mar 12. PMID: 33710712; PMCID: PMC7981591.

Del Rio, D., Rodriguez-Mateos, A., Spencer, J. P. E., Tognolini, M., Borges, G., & Crozier, A. (2013). Dietary polyphenolics in human health: Structures, bioavailability, and evidence of protective effects. *Antioxidants & Redox Signaling*, 18(14), 1818–1892. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.4581>

Di Majò D, Sardo P, Giglia G, Di Liberto V, Zummo FP, Zizzo MG, Caldara GF, Rappa F, Intili G, van Dijk RM, Gallo D, Ferraro G, Gambino G. Correlation of Metabolic Syndrome with Redox Homeostasis Biomarkers: Evidence from High-Fat Diet Model in Wistar Rats. *Antioxidants (Basel)*. 2022 Dec 30;12(1):89. doi: 10.3390/antiox12010089. PMID: 36670955; PMCID: PMC9854509.

FAO/WHO. (2007). Protein and amino acid requirements in human nutrition. WHO Technical Report Series No. 935. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43411>

FAO. (2013). Dietary protein quality evaluation in human nutrition. FAO Food and Nutrition Paper No. 92. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i3124e/i3124e.pdf>

Goodman, M.M. The races of maize v: grouping maize races on the basis of ear morphology. *Econ Bot* 31, 471–481 (1977). <https://doi.org/10.1007/BF02912560>

Grundy, S. M. (2016). Metabolic syndrome update. *Trends in Cardiovascular Medicine*, 26(4), 364–373.

Ipsen, D. H., et al. (2018). Molecular mechanisms of hepatic lipid accumulation. *Progress in Lipid Research*, 71, 1–24.

Kim, S. Y., et al. (2017). Polyphenols regulate lipid metabolism. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 47, 1–11.

Kobi JBBS, Matias AM, Gasparini PVF, Torezani-Sales S, Madureira AR, da Silva DS, Correa CR, Garcia JL, Haese D, Nogueira BV, de Assis ALEM, Lima-Leopoldo AP, Leopoldo AS. High-fat, high-sucrose, and combined high-fat/high-sucrose diets effects in oxidative stress and inflammation in male rats under presence or absence of obesity. *Physiol Rep*. 2023 Apr;11(7):e15635. doi: 10.14814/phy2.15635. PMID: 37032431; PMCID: PMC10083166.

Kou, X., et al. (2018). Ameliorative effects of *Moringa oleifera* Lam seed extract on liver fibrosis in rats. *Food Chem Toxicol*. 2010 Jan;48(1):345-55. doi: 10.1016/j.fct.2009.10.022. Epub 2009 Oct 23. PMID: 19854235.

Linkon, K. M. R., et al. (2024). Effects of plant-based high-fiber diet on blood cholesterol profile. *Clinical Nutrition Open Science*. doi:10.1016/j.nutos.2024.03.015

López-Martínez, L. X., et al. (2009). Antioxidant activity of Mexican pigmented maize. *LWT*, 42, 1187–1192.

Martínez-Flores, H. E., Garnica-Romo, M. G., & Paredes-López, O. (2002).

Mbikay, M. (2012). Therapeutic potential of *Moringa oleifera* leaves in chronic hyperglycemia and dyslipidemia. *Frontiers in Pharmacology*, 3, 24.

Mora-Rochín, S., et al. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of pigmented maize tortillas. *Journal of Cereal Science*, 52, 502–508.

Nutritional evaluation of complementary foods based on maize and legumes. *Food Chemistry*, 79(3), 347–354. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00155-7](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00155-7)

Reeves, P. G., Nielsen, F. H., & Fahey, G. C. (1993). AIN-93 purified diets for laboratory rodents: Final report of the American Institute of Nutrition ad hoc writing committee on the reformulation of the AIN-76A rodent diet. *Journal of Nutrition*, 123(11), 1939–1951.

Samuel, V. T., & Shulman, G. I. (2018). Nonalcoholic fatty liver disease. *Cell Metabolism*, 27(1), 22–41.

Sánchez-Muniz, F. J. (2012). Dietary fiber and cardiovascular health. *Redalyc*.

Santiago-Ramos, D., et al. (2018). Effect of nixtamalization on phenolic compounds. *Food Chemistry*, 239, 114–121.

Shiriki, D., Igyor, M. A., & Gernah, D. I. (2015). Nutritional evaluation of complementary foods formulated from maize, soybean and peanut fortified with moringa leaf powder. *Food and Nutrition Sciences*, 6, 494–500.

Slavin, J. L. (2013). Dietary fiber and body weight. *Nutrition*, 29(4), 539–543. Stuber, 2000^a

Rodríguez-Rodríguez C, Torres N, Gutiérrez-Urbe JA, Noriega LG, Torre-Villalvazo I, Leal-Díaz AM, Antunes-Ricardo M, Márquez-Mota C, Ordaz G, Chavez-Santoscoy RA, Serna-Saldivar SO, Tovar AR. The effect of isorhamnetin glycosides extracted from *Opuntia ficus-indica* in a mouse model of diet induced obesity. *Food Funct*. 2015 Mar;6(3):805-15. doi: 10.1039/c4fo01092b. PMID: 25588195.

Vergara-Jiménez, M., et al. (2017). Bioactive components in *Moringa oleifera* leaves. *Journal of Food Science*, 82(4), 785–792.

WHO (2020). Healthy diet. World Health Organization.

5 **Discusión general**

El presente trabajo se estructuró bajo un enfoque secuencial que integró la caracterización de materias primas, la reformulación de un alimento tradicional y la evaluación biológica de sus efectos nutricionales y metabólicos. Esta aproximación permitió analizar de manera integral cómo las modificaciones composicionales introducidas en las tortillas de maíz, mediante la incorporación de *Moringa oleifera*, se reflejan no solo en parámetros químicos y tecnológicos, sino también en respuestas fisiológicas medibles en un modelo biológico.

En el Capítulo II se evidenció que los maíces criollos, particularmente las variedades pigmentadas, presentan un valor nutrimental relevante asociado a su contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, aunque mantienen limitaciones inherentes en términos de calidad proteica. La nixtamalización, si bien mejora aspectos tecnológicos y de biodisponibilidad mineral, no corrige de forma sustancial el desbalance aminoacídico característico del maíz. Estos resultados justificaron la necesidad de explorar estrategias de complementación proteica que permitieran mejorar el valor nutricional del producto final sin alterar su identidad como alimento tradicional.

El Capítulo III demostró que la incorporación de harina de hoja de *Moringa oleifera* y, de manera más marcada, de su concentrado proteico, permitió incrementar el contenido total de proteína y mejorar el perfil de aminoácidos esenciales de las tortillas, particularmente en lisina y triptófano, aminoácidos reconocidos como limitantes en los cereales. De forma paralela, se observó un aumento en el contenido de fibra dietética y compuestos fenólicos, especialmente en las formulaciones elaboradas con maíz rojo, sin que ello comprometiera de manera significativa las propiedades tecnológicas del producto. Estos hallazgos posicionan a la tortilla fortificada como una matriz viable para integrar ingredientes de origen vegetal con potencial nutricional y bioactivo.

La evaluación biológica desarrollada en el Capítulo IV permitió establecer un vínculo funcional entre las mejoras composicionales observadas y su impacto fisiológico. En la primera etapa del estudio, los resultados de PER y digestibilidad confirmaron que la calidad de la proteína dietaria está fuertemente determinada por su perfil aminoacídico y su disponibilidad, más allá del contenido proteico total. Las tortillas elaboradas exclusivamente con maíz mostraron una baja eficiencia proteica, mientras que la adición de concentrado proteico de moringa produjo mejoras consistentes, aunque parciales, en estos indicadores. El hecho de que dichas mejoras no alcanzaran los valores observados con proteínas de referencia como la caseína es coherente con la naturaleza vegetal de la fuente proteica y con la complejidad estructural de la matriz alimentaria, y no representa una limitación metodológica del estudio. En la segunda etapa experimental, orientada a evaluar los efectos metabólicos bajo un modelo de dieta hiperlipídica, los resultados sugieren que la incorporación de tortillas ricas en fibra dietética y compuestos fenólicos puede modular de manera favorable algunos parámetros asociados al metabolismo lipídico y glucémico. En particular, las dietas que incluyeron tortillas de maíz rojo y tortillas de maíz rojo adicionadas con moringa mostraron

una reducción en la acumulación de lípidos hepáticos y en los niveles de triglicéridos séricos en comparación con la dieta hiperlipídica control, aun cuando el desafío lipídico global fue el principal determinante del aumento del peso hepático. Estos hallazgos son congruentes con la literatura que atribuye a la fibra dietética y a los polifenoles un papel modulador en la absorción intestinal de lípidos, la excreción fecal de grasas y la regulación de rutas metabólicas relacionadas con la lipogénesis y la oxidación de ácidos grasos.

No obstante, los resultados indican que dichas mejoras metabólicas son de magnitud moderada y deben interpretarse dentro del contexto de un modelo experimental controlado y de corta duración. Esto resalta la importancia de no extrapolar de manera directa estos efectos a escenarios clínicos, pero sí de reconocer su relevancia como evidencia preliminar del potencial de alimentos reformulados para contribuir a la mejora del perfil metabólico dentro de dietas complejas.

Los resultados de esta tesis muestran que la reformulación de tortillas de maíz mediante la incorporación de *Moringa oleifera* puede generar beneficios nutricionales medibles, tanto en términos de calidad proteica como de modulación metabólica, sin perder la naturaleza del alimento como componente central de la dieta tradicional. La integración de análisis composicionales, tecnológicos y biológicos permitió una evaluación más completa del impacto de esta estrategia, destacando que las mejoras observadas son consistentes, pero parciales, y dependen de la interacción entre la matriz alimentaria, la composición del ingrediente añadido y el contexto dietario global.

Finalmente, este trabajo aporta evidencia experimental que respalda el uso de alimentos tradicionales reformulados como herramientas potenciales para mejorar la calidad de la dieta en poblaciones con alta dependencia de cereales, al tiempo que pone de manifiesto la necesidad de estudios adicionales que exploren diferentes niveles de inclusión, periodos experimentales más prolongados y modelos de evaluación complementarios.

6 Conclusiones generales

El presente proyecto permitió evaluar de manera integral el potencial nutricional y metabólico de tortillas de maíz criollo reformuladas mediante la incorporación de *Moringa oleifera*, a partir de un enfoque secuencial que abarcó la caracterización de materias primas, la reformulación del alimento y la evaluación biológica en modelos experimentales controlados. Esta aproximación facilitó establecer relaciones claras entre los cambios composicionales inducidos en las tortillas y sus efectos fisiológicos, sin perder de vista la complejidad inherente a la matriz alimentaria y al contexto dietario.

Los resultados obtenidos en la caracterización de granos y harinas confirmaron que los maíces criollos pigmentados presentan un valor nutricional relevante, particularmente por su contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante. No obstante, se corroboró que la nixtamalización, aunque aporta beneficios tecnológicos y nutrimentales específicos, no corrige de manera sustancial las limitaciones en la calidad proteica del maíz, especialmente la deficiencia en aminoácidos esenciales como lisina y triptófano. Estos hallazgos justifican la necesidad de estrategias de complementación proteica orientadas a mejorar el valor biológico de productos derivados de este cereal.

La incorporación de harina de hoja de *Moringa oleifera* y, de manera más marcada, de su concentrado proteico, permitió mejorar el contenido total de proteína y el perfil de aminoácidos esenciales de las tortillas, sin afectar de forma significativa sus propiedades tecnológicas. Asimismo, la adición de moringa incrementó el contenido de fibra dietética y compuestos fenólicos, particularmente en las tortillas elaboradas con maíz rojo, lo que posiciona a estas formulaciones como matrices alimentarias con un perfil nutricional más equilibrado en comparación con las tortillas convencionales.

La evaluación biológica de la calidad proteica demostró que las mejoras composicionales observadas se traducen en efectos fisiológicos medibles. Las tortillas elaboradas exclusivamente con maíz mostraron una baja eficiencia proteica y digestibilidad reducida, confirmando que la proteína del maíz no es adecuada como única fuente para sostener un crecimiento óptimo. En contraste, la adición de concentrado proteico de *Moringa oleifera* permitió incrementos consistentes en el índice de eficiencia proteica y en la digestibilidad aparente, evidenciando una mejora parcial pero significativa en la utilización metabólica de la proteína dietaria. Si bien estos valores no alcanzaron los observados con proteínas de referencia como la caseína, los resultados confirman el papel de la moringa como ingrediente complementario eficaz dentro de una matriz alimentaria compleja. En la segunda etapa del estudio, orientada a evaluar efectos metabólicos bajo un modelo de dieta hiperlipídica, se observó que la inclusión de tortillas ricas en fibra dietética y compuestos fenólicos, particularmente las elaboradas con maíz rojo y adicionadas con moringa, se asoció con una reducción en la acumulación de lípidos hepáticos y con mejoras en algunos parámetros del perfil lipídico sérico. Estos efectos, aunque de magnitud moderada, sugieren que la reformulación de alimentos tradicionales puede contribuir a atenuar alteraciones metabólicas

inducidas por dietas altas en grasa, especialmente cuando se integran ingredientes vegetales con propiedades bioactivas documentadas.

Los resultados de esta tesis demuestran que la reformulación de tortillas de maíz mediante la incorporación de *Moringa oleifera* representa una estrategia viable para mejorar tanto la calidad proteica como el perfil nutricional global de un alimento básico de alto consumo. El estudio aporta evidencia experimental sólida que respalda el potencial de alimentos tradicionales reformulados como herramientas complementarias para mejorar la calidad de la dieta en contextos donde el acceso a proteínas de origen animal es limitado. Al mismo tiempo, los hallazgos resaltan la necesidad de investigaciones futuras que evalúen distintos niveles de inclusión, periodos de consumo más prolongados y su impacto en escenarios fisiológicos y poblacionales más amplios, con el fin de consolidar su aplicación dentro de estrategias de nutrición y salud pública.

Noe Calderón Téllez

Caracterización y desarrollo de tortillas de maíces criollos.docx

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:560076569

Fecha de entrega

23 feb 2026, 4:57 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

23 feb 2026, 5:02 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Caracterización y desarrollo de tortillas de maíces criollos.docx

Tamaño del archivo

6.4 MB

97 páginas

35.265 palabras

203.849 caracteres

14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 14%  Fuentes de Internet
- 10%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas	
Título del trabajo	Caracterización y desarrollo de tortillas de maíces criollos adicionados con harina de hojas de Moringa oleifera.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Noe Calderon Teller	1414489JJ@umich.mx
Director	Héctor Eduardo Martínez Flores	hector.martinez.flores@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Martha Elena Pedraza Santos	jef.div.posg.fab@umich.mx

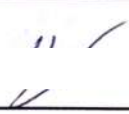
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Mejora en la redacción (syntax)

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Si	Corrección a estilo científico
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, Mx. 20/02/27