



EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE TORTILLAS NIXTAMALIZADAS DE MAÍZ NATIVO FORTIFICADAS CON HARINA ENTERA DE *Jatropha curcas* L

PHYSICOCHEMICAL ASSESSMENT OF NIXTAMALIZED NATIVE MAIZE TORTILLAS FORTIFIED WITH WHOLE *Jatropha curcas* L. FLOUR

Elizabeth Argüello-García¹, Amalia Mayeli García-López², Jorge Martínez-Herrera^{3*}, Guadalupe Luna-Solano⁴, Arturo Pérez-Vázquez¹, Mayra Y. De La Cruz-De Jesús², Gregorio Hernández-Salinas² e Irene Gutiérrez Mora²

¹Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz, Predio Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México. ²Tecnológico Nacional de México, Campus Zongolica, Zongolica, Veracruz, México. ³Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Cuitláhuac, Veracruz, México. ⁴Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia (jmartin62@hotmail.com)

RESUMEN

La erosión genética y la limitada diversificación nutricional de alimentos básicos justifican la revalorización de recursos fitogenéticos nativos. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la fortificación con harina entera (sin desgrasar) de *Jatropha curcas* L. sobre la calidad fisicoquímica de tortillas nixtamalizadas elaboradas con maíz nativo *Zea mays* L. (Tuxpeño × Olotillo) de Coetzala, Veracruz, México. Se formularon mezclas maíz/*J. curcas* en proporciones 100/0, 95/5, 90/10 y 85/15, y en las tortillas se determinó composición proximal, actividad de agua y color CIELAB. Los datos se analizaron mediante ANOVA, pruebas de Tukey ($P \leq 0.05$) y análisis de componentes principales (ACP) para explorar la relación entre variables fisicoquímicas. La harina entera de *J. curcas* presentó 50.84 % de lípidos y 21.17 % de proteína, lo que respaldó su uso como ingrediente de fortificación. En tortillas, la proteína aumentó de 5.58 % en el testigo a 8.51 % en el tratamiento con 15 % de *J. curcas*, mientras que los lípidos se incrementaron de 1.09 a 12.62 %. La actividad del agua permaneció estable (0.83-0.84), la humedad disminuyó con respecto al control y el color no mostró diferencias significativas entre tratamientos. El ACP explicó 90.1 % de la varianza total y asoció los tratamientos con 10 y 15 % de *J. curcas* con mayor contenido de proteína, lípidos y cenizas. Los resultados indicaron que la fortificación con harina entera de *J. curcas* en niveles de 10 a 15 % es tecnológicamente viable para incrementar la densidad nutricional de tortillas elaboradas con maíz nativo sin presentar cambios significativos en la actividad de agua ni en los parámetros instrumentales de color.

Palabras clave: *Zea mays*, calidad fisicoquímica, Coetzala, fortificación, nixtamalización.

SUMMARY

Genetic erosion and limited nutritional diversification of staple foods support the revalorization of native plant genetic resources. The objective of this study was to evaluate the effect of fortification with whole flour (non-defatted) of *Jatropha curcas* L. on the physicochemical quality of nixtamalized tortillas made with native maize (*Zea mays* L., Tuxpeño × Olotillo) from Coetzala, Veracruz, Mexico. Maize/*J. curcas* blends were formulated in proportions 100/0, 95/5, 90/10, and 85/15, and tortillas were analyzed for proximal composition, water activity and CIELAB color parameters. Data were analyzed by ANOVA, Tukey tests ($P \leq 0.05$) and principal component analysis (PCA) to explore relationships between physicochemical variables. Whole flour of *J. curcas* presented 50.84 % lipids and 21.17 % protein, supporting its

use as a fortifying ingredient. In tortillas, protein increased from 5.58 % in the control to 8.51 % in treatment with 15 % *J. curcas*, while lipids rose from 1.09 to 12.62 %. Water activity remained stable (0.83-0.84), moisture decreased compared to the control, and color showed no significant differences between treatments. PCA explained 90.1 % of the total variance and associated treatments with 10 and 15 % *J. curcas* with higher protein, lipids and ash content. Results indicated that fortification with whole flour of *J. curcas* at levels of 10 to 15% is technologically viable to enhance the nutritional value of tortillas made with native maize without significantly affecting water activity or instrumental color parameters.

Index words: *Zea mays*, Coetzala, fortification, nixtamalization, physicochemical quality.

INTRODUCCIÓN

La erosión genética de los recursos fitogenéticos compromete la seguridad alimentaria, particularmente en países megadiversos como México, donde existe una amplia agrobiodiversidad nativa (Ramírez *et al.*, 2000). En este contexto, piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.) y maíz (*Zea mays* L.) son dos especies nativas utilizadas como alimento desde la época prehispánica. En México, la cultura gastronómica totonaca incluye la preparación de diversos platillos tradicionales con *J. curcas* comestible (Valdes-Rodriguez *et al.*, 2013). El maíz se consume principalmente en forma de tortilla, alimento que aporta alrededor de 70 % de las calorías y 50 % de las proteínas diarias, con un consumo *per cápita* anual de 79.5 y 56.7 kg en población rural y urbana, respectivamente (Colín-Chávez *et al.*, 2020). Asimismo, se estima que dos tercios de la tortilla consumida en México se producen mediante nixtamalización (Nieves-Hernández *et al.*, 2024). En este marco, las razas nativas de maíz, entendidas como poblaciones locales diferenciadas y adaptadas a condiciones ambientales y culturales específicas, constituyen un reservorio estratégico de diversidad biocultural y alimentaria (Ortega, 2021; Ramírez *et al.*, 2000).

Aunque la tortilla es un alimento central en la dieta mexicana, su composición nutrimental puede ser limitada, ya que generalmente presenta contenidos de proteína cercanos a 5-9 % y una calidad proteica restringida por la baja proporción de aminoácidos esenciales como lisina y triptófano (Argüello-García *et al.*, 2017); por ello, resulta pertinente explorar estrategias de fortificación que mejoren la densidad nutrimental y la calidad fisicoquímica de la tortilla. En este sentido, diversos estudios han evaluado alternativas de fortificación. Nieves-Hernández *et al.* (2024) fortificaron tortillas mediante mezclas de masa nixtamalizada tradicional y harina comercial de maíz, mientras que Contreras *et al.* (2020) evaluaron tortillas de maíz variedad Puma fortificadas con harina de chapulín (*Sphenarium purpurascens*), observando aumento en el contenido proteico, aunque con cambios en viscosidad y dureza de la masa.

Argüello-García *et al.* (2017) evaluaron tortillas de maíz comercial fortificadas con harina desgrasada de *J. curcas* comestible proveniente de Pueblillo, Papantla, Veracruz, México, y concluyeron que esta harina puede alcanzar hasta 55 % de proteína, lo que confirma su potencial para enriquecer el contenido proteico de tortillas; sin embargo, el uso de harina entera (sin desgrasar) merece atención particular, ya que además del componente proteico incorpora una fracción lipídica importante que puede modificar la densidad energética y el comportamiento fisicoquímico del producto final. En Veracruz, México se han estudiado diversas razas nativas de maíz en tortillas y tostadas artesanales (Ramírez-Rivera *et al.*, 2024). No obstante, la incorporación de recursos fitogenéticos nativos con alto potencial nutricional, como *J. curcas*, en matrices tradicionales elaboradas con maíz nativo sigue siendo limitada. Aunque estudios previos han empleado niveles de sustitución de entre 5 y 20 %, aún es necesario generar evidencia sobre el efecto de intervalos de fortificación tecnológicamente viables en tortillas elaboradas con maíz nativo.

La relevancia de enriquecer tortillas con *J. curcas* se sustenta en su carácter de recurso fitogenético comestible, nativo y subutilizado, con aporte de proteína y lípidos, lo que permite incrementar el contenido nutrimental de una matriz alimentaria básica en México; por ello, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de distintos niveles de fortificación con harina entera de *Jatropha curcas* L. sobre la calidad fisicoquímica de tortillas nixtamalizadas de maíz nativo (raza Tuxpeño × Olotillo) mediante la evaluación de su composición proximal, actividad de agua y color.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El municipio de Coetzala se ubica en la zona de Las Altas Montañas del estado de Veracruz, México, entre los paralelos 18° 45' y 18° 48' LN y los meridianos 96° 54' y 96° 57' LO, con altitudes desde los 500 hasta los 1600 msnm (Figura 1). Se caracteriza por poseer un clima semicálido húmedo principalmente, con abundantes lluvias en verano (93 %) (SIEGVER, 2023). La mayor superficie continental del municipio es destinada a la agricultura (7.4 km²), donde se cultivan principalmente caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), café robusta (*Coffea canephora*) y maíz (*Zea mays*). El municipio es catalogado con muy altos grados de marginación y rezago social (SIEGVER, 2023).

Material vegetal

La recolecta del maíz Tuxpeño × Olotillo se realizó en Coetzala, Veracruz, México (Figura 1), siguiendo el método de Ortega (2021) con base en caracteres morfológicos de mazorca y grano e información de productores locales. Las semillas de *J. curcas* comestible se obtuvieron en el mismo municipio mediante recorridos de campo y con apoyo de pobladores que conservan arbustos de piñón en sus traspatios. La época de cosecha fue de agosto a octubre de 2025, se utilizaron todos los frutos colectados para conformar un lote único, del cual se obtuvieron las almendras y la harina base de los tratamientos. Se seleccionaron frutos en madurez fisiológica, clasificados localmente como completamente desarrollados y amarillos o secos, y se descartó material con daño visible por insectos y hongos. Posterior a la colecta, los frutos se transportaron en recipientes limpios y ventilados al Laboratorio de Procesos del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Campus Orizaba, donde se eliminaron manualmente las impurezas. Las semillas se separaron, se secaron a la sombra en charolas hasta alcanzar humedad estable (< 10 %) para reducir la actividad de agua y evitar deterioro microbiano, y después se descascararon manualmente para obtener las almendras. Finalmente, se descartaron aquellas con decoloración, rancidez aparente u olor anómalo (Argüello-García *et al.*, 2017).

Para minimizar la absorción de humedad y la oxidación lipídica, las almendras acondicionadas se almacenaron en bolsas herméticas de grado alimenticio a 4 °C hasta su procesamiento; posteriormente, se molieron en un molino eléctrico de 150 W (Novaka, Miami, Florida, EUA) para obtener la harina utilizada en los análisis y elaboración de las tortillas.

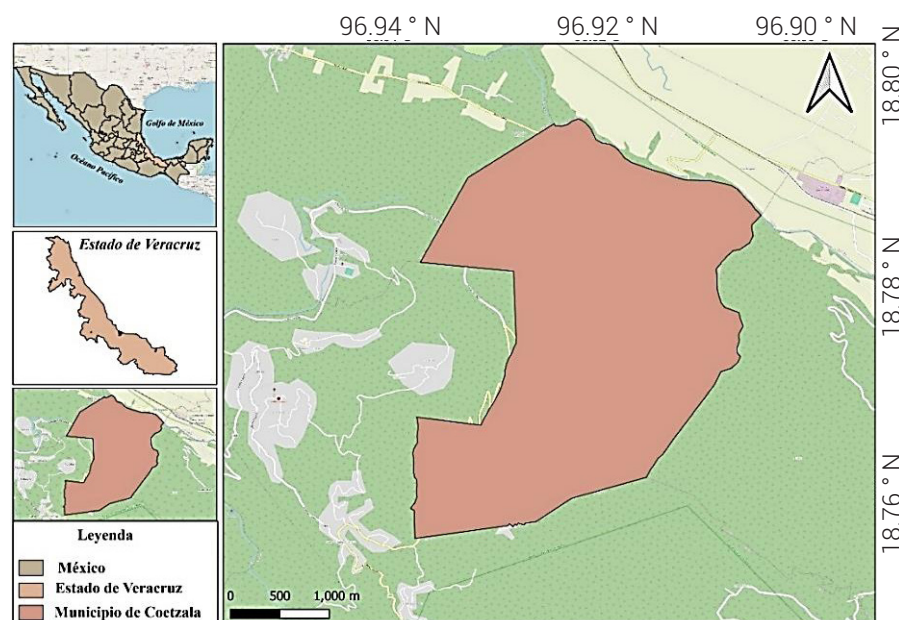


Figura 1. Ubicación del municipio de Coetzala, Veracruz, México. La clasificación racial del maíz fue realizada por el Dr. Rafael Ortega Paczka¹.

Tratamientos

Se establecieron cuatro tratamientos: un testigo sin fortificación y tres niveles de incorporación de harina entera de *Jatropha curcas* (5, 10 y 15 %). La selección de estos niveles se sustentó en antecedentes de viabilidad tecnológica (Argüello-García *et al.*, 2017) y en su pertinencia para evaluar el efecto de la fortificación sobre la calidad fisicoquímica de las tortillas. Cada tratamiento se evaluó en tres repeticiones.

Los tratamientos se describen en el Cuadro 1, estos permitieron establecer comparabilidad experimental con el estudio previo de Argüello-García *et al.* (2017); sin embargo, en el presente estudio tales formulaciones se aplicaron a tortillas elaboradas con maíz nativo Tuxpeño × Olotillo y harina entera (sin desgrasar) de *Jatropha curcas* L., lo que permitió evaluar su efecto sobre la calidad fisicoquímica en una matriz alimentaria distinta.

Proceso de nixtamalización y elaboración de tortillas

El proceso de nixtamalización se realizó con base en el método descrito por Salinas *et al.* (2017), con adecuaciones a escala experimental. Para ello, se utilizaron 200 g de grano de maíz limpio, a los cuales se adicionaron 500 mL de agua destilada y 0.49 g de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. La mezcla se calentó en una parrilla eléctrica hasta alcanzar ebullición y se mantuvo bajo esta condición durante 30

min. Este tiempo de cocción se estableció de acuerdo con la respuesta del grano durante el proceso, considerando su ablandamiento como criterio práctico de cocción (Palacios-Fonseca *et al.*, 2009; Salinas *et al.*, 2017). Los granos cocidos se dejaron en reposo durante 12 h a temperatura ambiente (25 °C) (Palacios-Fonseca *et al.*, 2009). El nixtamal obtenido se lavó tres veces con agua corriente para retirar el exceso de cal y se molió manualmente hasta obtener masa fresca. Las formulaciones se prepararon con base en 100 g de mezcla, integrada por masa de maíz nixtamalizada fresca y harina de *Jatropha curcas* L. en las proporciones correspondientes a cada tratamiento. Para facilitar el amasado y la integración de los componentes, se incorporaron gradualmente 120 mL de agua destilada hasta obtener una masa maleable y uniforme.

La masa se dividió en porciones de 30 g, las cuales se laminaron mediante una prensa metálica manual para obtener discos de aproximadamente 15 cm de diámetro y 2 mm de grosor (Astorga-Gaxiola *et al.*, 2026). La cocción se realizó en comal metálico a 260 ± 10 °C, de acuerdo con condiciones reportadas para la elaboración de tortillas nixtamalizadas (Bello-Pérez *et al.*, 2014; Salinas *et al.*, 2017). Después de la cocción, las tortillas se dejaron enfriar a temperatura ambiente, se pesaron y se envasaron en bolsas de cierre hermético. Finalmente, las muestras se conservaron en refrigeración a 4 ± 1 °C hasta su evaluación.

Análisis químico proximal

El análisis químico proximal se realizó en las harinas de *J. curcas* (HJC-SD), de maíz nativo raza Tuxpeño × Olotillo

¹Rafael Ortega Paczka, Especialista en Recursos Fitogenéticos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México.

(HMN) y en tortillas fortificadas. Previo a los análisis, las muestras se homogeneizaron y molieron hasta obtener un tamaño de partícula uniforme (tamiz 60). En el caso de las tortillas, se secaron previamente a 45-50 °C hasta peso constante y posteriormente se pulverizaron (Argüello-García *et al.* (2017). La humedad se determinó por secado en estufa a 105 °C hasta peso constante, con el Método 925.10 (AOAC International, 2019); en tanto, las cenizas se cuantificaron por incineración en mufla a 550 °C , con el Método 923.03 de AOAC, mientras que la proteína cruda se determinó mediante Kjeldahl, con el Método 979.09 de AOAC, con factor N × 6.25, y los lípidos se cuantificaron mediante extracción Soxhlet con hexano bajo el Método 920.39 de AOAC. Los carbohidratos se estimaron por diferencia en base seca (AOAC International, 2019). La actividad de agua (aw) se midió a 25 ± 0.5 °C con un equipo portátil (Modelo VTS-160A, VTSYIQI, Hefey, China).

Color en harinas y tortillas

El color de las harinas de *J. curcas* (HJC-SD), de maíz nativo raza Tuxpeño × Olotillo (HMN) y tortillas se determinó por colorimetría instrumental en el equipo CIELAB (L*, a*, b*) siguiendo los lineamientos de la CIE para la interpretación de estos valores (CIE, 2019). Las mediciones se realizaron con un colorímetro portátil configurado con iluminante D65 y observador 10°, previa calibración con el estándar del fabricante. Los valores L*, a* y b* se registraron en tortillas enfriadas a temperatura ambiente, colocando el sensor sobre la superficie de lectura. Con los valores de a* y b* se calcularon la pureza del color (Croma) y el °Hue en las tortillas (Luga *et al.*, 2019).

Análisis estadístico

Todas las determinaciones físico-químicas de las harinas y de las tortillas se analizaron mediante análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey (P ≤ 0.05) en RStudio® versión 4.3 (RStudio Team,

2019) y se expresaron como media ± desviación estándar (n = 3). Posteriormente, se construyó un biplot con las características de química proximal y color de las muestras de tortillas y se determinó su similitud con el programa de cómputo NTSYS versión 2.2 (Colín-Chávez *et al.*, 2020; Rohlf, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición proximal de la materia prima

La harina entera de *J. curcas* presentó un perfil característico de una oleaginosa comestible, con alto contenido de lípidos (50.84 %) y proteína (21.17 %), baja humedad (4.65 %) y una fracción moderada de carbohidratos (18.48 %) (Cuadro 2). Este patrón es consistente con lo reportado para accesiones no tóxicas de *J. curcas* en México, donde los contenidos de aceite suelen oscilar entre 46-65 % y de proteína entre 18-30 % en base seca, dependiendo del ecotipo (García *et al.*, 2017; Makkar *et al.*, 1997; Martínez-Herrera *et al.*, 2006). En particular, estudios con *J. curcas* comestible en Veracruz y otras regiones de México han reportado valores de lípidos cercanos a 52-61 % y proteína alrededor de 20-26 %, lo que confirma que los resultados obtenidos para *J. curcas*, procedencia Coetzala, se ubican dentro del intervalo esperado para materiales comestibles seleccionados (García *et al.*, 2017).

El contenido de cenizas (3.24 %) en la harina de *J. curcas* también concuerda con reportes para semillas y almendras de esta especie, donde las cenizas suelen situarse entre 3 y 5 %, aunque con amplia variabilidad según el grado de descascarado y la fracción del grano analizada (Makkar *et al.*, 1997; Martínez-Herrera *et al.*, 2006). En conjunto, este perfil confirma el potencial de la harina entera de *J. curcas* como ingrediente energético-proteico, pero también implica una mayor susceptibilidad a oxidación lipídica (García *et al.*, 2017).

Cuadro 1. Tratamientos de harina nixtamalizada de maíz nativo Tuxpeño × Olotillo/harina de *J. curcas* entera para la elaboración de tortillas (2026).

Tratamiento	Harina	
	Maiz nativo (%)	<i>J. curcas</i> (%)
T-T	100	0
T-5	95	5
T-10	90	10
T-15	85	15

Cuadro 2. Composición proximal de harinas procedente del Municipio de Coetzala, Veracruz, México (2026).

Variable	Harina de <i>J. curcas</i> entera (HJC-SD)	Harina de maíz nativo (HMN)	DSH
Humedad	4.65 ± 0.02 b	16.72 ± 0.2 a	0.45
Proteína	21.17 ± 0.03 a	8.29 ± 0.01 b	0.04
Lípidos	50.84 ± 0.04 a	3.74 ± 0.04 b	0.07
Cenizas	3.24 ± 0.01 a	1.41 ± 0.06 b	0.09
Carbohidratos	20.11 ± 0.05 b	69.85 ± 0.25 a	0.41

En base seca.

En contraste, la harina de maíz nativo mostró una composición típica de cereales, dominada por carbohidratos (69.85 %), con proteína (8.29 %), lípidos (3.74 %) y cenizas (1.41 %) (Cuadro 2). Estos valores son comparables con los reportados para harinas de maíces nativos mexicanos, donde el contenido de proteína suele encontrarse entre 8 y 11 %, los lípidos entre 3 y 5 % y las cenizas alrededor de 1-3 % en base seca, dependiendo de la raza, el color del grano y el manejo poscosecha (Hernández-Villaseñor *et al.*, 2025; Langyan *et al.*, 2022). El contenido de carbohidratos observado se sitúa dentro del intervalo general reportado para harinas de maíz nativo (60-75 %), aunque algunos estudios reportan valores ligeramente superiores cuando el grano se encuentra más seco o cuando se analiza preferentemente el endospermo (Dongmo *et al.*, 2020).

Un aspecto relevante es la humedad relativamente alta del maíz (16.76 %), aun cuando los resultados se reportan en base seca. Este valor es superior a lo recomendado para harinas de maíz destinadas a almacenamiento (generalmente < 14 %), lo que sugiere que el grano o la harina pudieron presentar secado incompleto o reabsorción de humedad ambiental antes del análisis (Dongmo *et al.*, 2020).

Desde el punto de vista tecnológico, una mayor humedad inicial puede influir en la absorción de agua durante la nixtamalización, así como en la estabilidad durante almacenamiento previo, y debe considerarse al interpretar la variabilidad en la calidad de masa y tortilla (Palacios-Fonseca *et al.*, 2009).

Desde la perspectiva de fortificación, la marcada diferencia entre ambas harinas anticipa un efecto claro sobre la matriz de tortilla: la incorporación de harina entera de *J. curcas* a una base predominantemente amilácea como el maíz nativo incrementaría la densidad energética (por lípidos) y el contenido proteico, desplazando parcialmente la fracción de carbohidratos (Argüello-García *et al.*, 2017). Este comportamiento es consistente con estudios previos

en tortillas fortificadas con *J. curcas* comestible, donde se ha documentado un aumento significativo de proteína y modificaciones en propiedades reológicas y sensoriales de la tortilla conforme se incrementa el nivel de sustitución (Argüello-García *et al.*, 2017). En este contexto, el uso de harina sin desgrasar explica que la proteína sea menor que la reportada para harinas desgrasadas (que pueden alcanzar > 50-60 % de proteína), pero a la vez aporta una fracción lipídica que puede influir positivamente en textura y palatabilidad, además de incrementar el valor energético (Martínez-Herrera *et al.*, 2006). También, el tiempo de remojo de los granos de maíz después del proceso de nixtamalización influye en la composición proximal de la harina; así, Palacios-Fonseca *et al.* (2009) encontraron medias de 8.64 y 8.63 % de proteínas, 4.13 y 3.89 % de lípidos, 11.03 y 11.27 % de humedad, a las 0 y 7 h de remojo, respectivamente.

Composición química proximal de tortillas de maíz fortificadas con harina de *J. curcas*

El contenido de humedad disminuyó significativamente entre tratamientos, desde 46.01 % en el testigo (T-T) hasta 37.29 % en T-15 (Cuadro 3), lo que indica una menor retención de agua conforme aumentó la proporción de harina entera de *J. curcas*. En contraste, la actividad de agua se mantuvo sin diferencias estadísticas entre tratamientos, con valores entre 0.83 y 0.84. Este comportamiento puede explicarse por la sustitución parcial de la fracción amilácea del maíz por harina entera de *J. curcas*, cuyo alto contenido lipídico reduce la capacidad de retención de agua total de la matriz; sin embargo, la actividad de agua no cambió significativamente, lo que indica que la fortificación modificó la humedad del producto, pero no la fracción de agua libre disponible (Rojo-Gutiérrez *et al.*, 2025). Asimismo, el proceso de nixtamalización influye en el contenido de humedad de las tortillas; en este sentido, Bello-Pérez *et al.* (2014) reportaron valores de 38.71, 36.99 y 45.88 % en tortillas tradicionales, tortillas con carbonato de calcio y tortillas comerciales, respectivamente.

El contenido de proteína aumentó significativamente conforme se incrementó el nivel de fortificación, al pasar de 5.58 % en T-T (d) a 6.62 % en T-5 (c), 7.83 % en T-10 (b) y 8.51 % en T-15 (a) (Cuadro 3). De manera similar, los lípidos también mostraron diferencias significativas entre tratamientos, con valores de 1.09 % en T-T (d), 3.66 % en T-5 (c), 7.85 % en T-10 (b) y 12.62 % en T-15 (a). Este patrón es consistente con la naturaleza de la harina de *J. curcas* utilizada, caracterizada por su elevado contenido de lípidos (50.84 %) y proteína (21.17 %), por lo que su incorporación tiende a desplazar parcialmente la fracción amilácea del maíz y a incrementar la densidad energética y proteica del producto (Argüello-García *et al.*, 2017). En tortillas fortificadas con *J. curcas* comestible, incrementos de sustitución de 5 a 20 % también han mostrado aumento en el contenido proteico y modificaciones en propiedades de masa y tortilla (Argüello-García *et al.*, 2017). Además, en tortillas artesanales elaboradas con razas nativas de maíz de Las Altas Montañas de Veracruz se han reportado contenidos de proteína relativamente bajos (3.84-4.66 %) (Ramírez-Rivera *et al.*, 2024), lo que resalta el efecto nutrimental de la fortificación observada en este estudio.

El comportamiento de la fortificación con *J. curcas* difiere de otros fortificantes más clásicos, como leguminosas y pseudocereales, debido a que el efecto dominante no solo fue el incremento proteico, sino también un aumento marcado de la fracción lipídica (Acevedo-Pacheco y Serna-Saldívar, 2016; Argüello-García *et al.*, 2017). Por ejemplo, en tortillas enriquecidas con soya (*Glycine max*), el principal objetivo suele ser mejorar el contenido y la calidad de proteína, con cambios menos extremos en lípidos (Acevedo-Pacheco y Serna-Saldívar, 2016; Contreras *et al.*, 2020). De manera similar, formulaciones de tortillas nixtamalizadas enriquecidas con soya (*Glycine max*) se han optimizado para balancear mejora nutrimental y aceptabilidad sensorial (Hassan *et al.*, 2024). En pseudocereales, como amaranto (*Amaranthus*

hypochondriacus), se han reportado incrementos de proteína y fibra junto con cambios tecnológicos, pero sin el salto lipídico de una oleaginosa entera como *J. curcas* (Gámez-Valdez *et al.*, 2021).

En cenizas, el mayor valor se observó en T-10 (2.80 %), mientras que T-T, T-5 y T-15 presentaron valores de 2.28, 2.54 y 2.58 %, respectivamente. Este comportamiento no necesariamente es lineal, ya que el contenido mineral final puede depender del aporte del ingrediente fortificante, de la retención de minerales durante la nixtamalización y de la pérdida de sólidos en el procesamiento (Palacios-Fonseca *et al.*, 2009). Asimismo, el incremento de cenizas y su estabilidad entre niveles de sustitución pueden variar según el ingrediente y las condiciones de proceso (Rojo-Gutiérrez *et al.*, 2025).

La harina de *Jatropha curcas* sin desgrasar (HJC-SD) presentó alta luminosidad ($L^* = 83.23 \pm 3.16$), valores positivos de a^* (0.80 ± 0.95) y b^* (20.50 ± 8.64), así como Croma de 20.50 ± 8.60 y °Hue de 86.87 ± 3.22 , lo que indica una coloración amarilla relativamente saturada. De manera similar, la harina de maíz nixtamalizado (HMN) mostró elevada luminosidad ($L^* = 81.32 \pm 5.71$), con $a^* = 1.50 \pm 0.56$, $b^* = 14.56 \pm 4.41$, Croma de 14.64 ± 4.41 y °Hue de 83.95 ± 2.11 . En las tortillas fortificadas, los valores de L^* oscilaron entre 64.228 ± 1.620 y 66.157 ± 0.656 , mientras que a^* varió de -1.280 ± 0.356 a -0.491 ± 0.696 , b^* de 27.100 ± 2.450 a 29.600 ± 0.260 , Croma de 27.114 ± 2.429 a 29.641 ± 0.268 y °Hue de 91.126 ± 1.677 a 92.481 ± 0.677 , sin diferencias significativas entre tratamientos. En conjunto, estos resultados indican que la incorporación de harina entera de *J. curcas* en niveles de 5, 10 y 15 % no modificó de manera estadísticamente detectable el color instrumental de las tortillas.

Los valores positivos de b^* y el °Hue cercano a 90° en ambas harinas confirman la presencia de tonalidades

Cuadro 3. Composición química proximal de tortillas de maíz nativo nixtamalizado raza Tuxpeño × Olotillo fortificadas con harina de *J. curcas* (2026).

Tratamiento	Humedad (%)	Actividad de agua (aw)	Proteína (%)	Lípidos(%)	Cenizas
T-T	46.013 ± 1.21a	0.836 ± 0.00a	5.580 ± 0.02d	1.090 ± 0.01d	2.280 ± 0.05c
T-5	43.263± 0.48b	0.840 ± 0.00a	6.620 ± 0.01c	3.665 ± 0.00c	2.540 ± 0.03b
T-10	34.677± 0.54d	0.836 ± 0.00a	7.830 ± 0.00b	7.850 ± 0.01b	2.805± 0.02a
T-15	37.293 ± 0.70c	0.833 ± 0.00a	8.513 ± 0.19a	12.625 ± 0.00a	2.585 ± 0.04b
DSH	1.487	0.009	0.184	0.015	0.073

Medias con la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Media ± DE (n = 3). DSH: diferencia significativa honesta. En base seca.

amarillo-brillantes, características de matrices vegetales con predominio de pigmentos amarillos y de harinas nixtamalizadas, en concordancia con Oluwadiran *et al.* (2025). No obstante, una vez incorporada la harina de *J. curcas* a la matriz nixtamalizada, las tortillas mantuvieron un comportamiento cromático homogéneo, lo que sugiere que el nivel de fortificación no fue suficiente para alterar de manera importante el color instrumental del producto final.

Análisis de componentes principales (ACP)

El ACP muestra la distribución de los tratamientos de las tortillas fortificadas con *J. curcas* en función de las variables de química proximal y de color, permitiendo separar aquellas que son similares o distintas de otras (Figura 2). Los dos primeros CP explicaron el 90.1 % de la variación total de las características analizadas. Las características asociadas al CP1 fueron lípidos, proteínas, cenizas, humedad y croma, mientras que la luminosidad se relacionó con el CP2. El gráfico biplot (Figura 2) muestra claramente la separación de las muestras de tortillas de maíz nativo fortificadas de acuerdo con la magnitud de los vectores propios (eigenvectors). Los tratamientos (T-10 % y T-15 %) con mayor contenido de lípidos, proteínas y cenizas se ubicaron en el cuadrante I, en tanto que los T-T y T-5 % con mayor croma, luminosidad y humedad se ubicaron en los cuadrantes II y III.

La separación observada en el ACP indica que la fortificación con harina entera de *J. curcas* afectó principalmente la composición proximal de las tortillas. Los tratamientos T-10 y T-15 se asociaron con mayores contenidos de lípidos, proteína y cenizas, lo que refleja el efecto composicional del ingrediente fortificante, mientras que T-T y T-5 conservaron mayor humedad, luminosidad y croma, manteniendo mayor similitud con la matriz base de maíz nativo.

CONCLUSIONES

La fortificación de tortillas nixtamalizadas elaboradas con maíz nativo Tuxpeño × Olotillo de Coetzala, Veracruz, México, mediante la incorporación de harina entera de *Jatropha curcas* L. modificó significativamente su composición proximal. El tratamiento con 15 % de *J. curcas* presentó los mayores contenidos de proteína y lípidos, mientras que el tratamiento con 10 % registró el mayor contenido de cenizas. La actividad de agua y los parámetros instrumentales de color no mostraron diferencias significativas entre tratamientos. Bajo las condiciones evaluadas, la incorporación de harina entera de *J. curcas* en niveles de 10 a 15 % representa una alternativa viable para incrementar la composición nutrimental de tortillas elaboradas con este maíz nativo, sin presentar cambios significativos en la actividad de agua ni en los parámetros instrumentales de color.

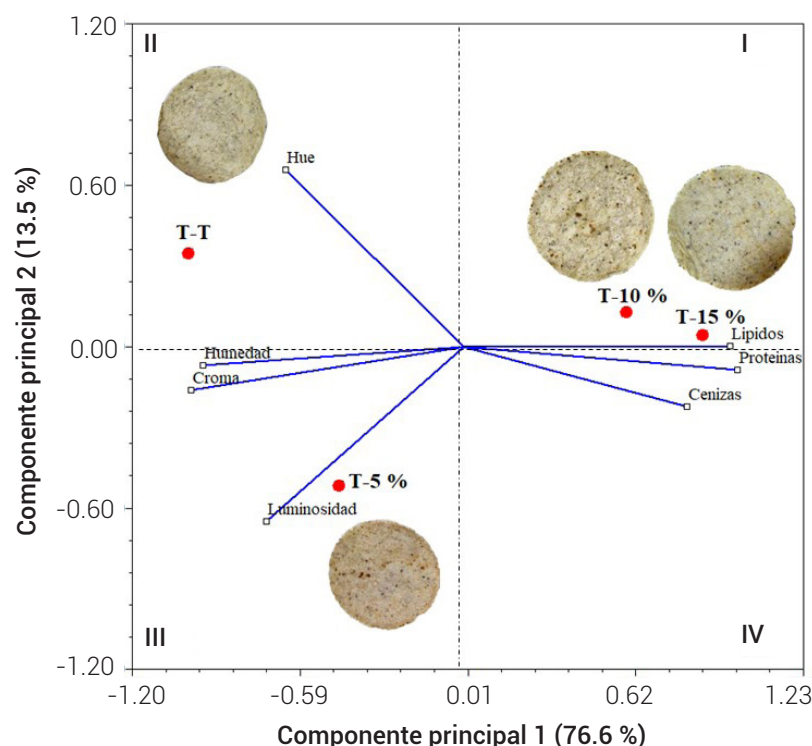


Figura 2. Biplot elaborado con los CP1 y CP2 de la composición físico-química de tortillas de maíz nativo fortificadas con harina de *J. curcas*.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo-Pacheco L. and S. O. Serna-Saldívar (2016) *In vivo* protein quality of selected cereal-based staple foods enriched with soybean proteins. *Food & Nutrition Research* 60:31382, <https://doi.org/10.3402/fnr.v60.31382>
- AOAC International (2019) Official Methods of Analysis of AOAC International. 21st edition. AOAC International. Rockville, Maryland, USA.
- Argüello-García E., J. Martínez-Herrera, L. Córdova-Téllez, O. Sánchez-Sánchez and T. Corona-Torres (2017) Textural, chemical and sensorial properties of maize tortillas fortified with nontoxic *Jatropha curcas* L. flour. *CyTA – Journal of Food* 15:301-306, <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1255915>
- Astorga-Gaxiola A. H., M. A. Picos-Salas, L. A. Cabanillas-Bojórquez, N. Leyva-López, E. P. Gutiérrez-Grijalva, M. García-Carrasco, ... y J. Estrada-Manjarrez (2026) Nutritional composition, phenolic compounds, and antioxidant capacity of blue corn tortillas fortified with quelites (*Amaranthus hybridus* L.). *Processes* 14:874, <https://doi.org/10.3390/pr14050874>
- Bello-Pérez L. A., P. C. Flores-Silva, E. Agama-Acevedo, J. D. Figueroa-Cardenas, J. A. Lopez-Valenzuela and O. H. Campanella (2014) Effect of the nixtamalization with calcium carbonate on the indigestible carbohydrate content and starch digestibility of corn tortilla. *Journal of Cereal Science* 60:421-425, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.05.001>
- CIE, International Commission on Illumination (2019) Colorimetry Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour Space (ISO/CIE 11664-4:2019). CIE/ISO. Vienna, Austria/Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso-cie:11664-4:ed-1:v1:en> (July, 2026).
- Colín-Chávez C., J. J. Virgen-Ortiz, L. E. Serrano-Rubio, M. A. Martínez-Téllez and M. Astier (2020) Comparison of nutritional properties and bioactive compounds between industrial and artisan fresh tortillas from maize landraces. *Current Research in Food Science* 3:189-194, <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.05.004>
- Contreras J. B., M. E. Oseguera T., L. García M., R. Martínez B., C. A. González G., F. Curiel A. and M. E. Rodríguez-García (2020) Physicochemical study of nixtamalized corn masa and tortillas fortified with "chapulin" (grasshopper, *Sphenarium purpurascens*) flour. *CyTA – Journal of Food* 18:527-534, <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1794980>
- Dongmo H., S. T. Tambo, G. B. Teboukeu, A. N. Mboukap, B. S. Fotso, M. C. T. Djuidje and J. M. Klang (2020) Effect of process and variety on physico-chemical and rheological properties of two corn flour varieties (Atp and Kassai). *Journal of Agriculture and Food Research* 2:100075, <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100075>
- Gámez-Valdez L. C., R. Gutiérrez-Dorado, C. A. Gómez-Aldapa, J. X. K Peralas-Sánchez, J. Milán-Carrillo, E. O. Cuevas-Rodríguez, ... and C. Reyes-Moreno (2021) Effect of the extruded amaranth flour addition on the nutritional, nutraceutical and sensory quality of tortillas produced from extruded creole blue maize flour. *Biotechnia* 23:103-112, <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i2.1385>
- García A. F., E. García P., A. Pérez V. y O. Ruiz-Rosado (2017) Contenido de aceite en accesos de *Jatropha curcas* L. no tóxica en Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:635-648, <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.37>
- Hassan S. M., S. F. Forsido, Y. B. Tola and A. M. Bikila (2024) Physicochemical, nutritional, and sensory properties of tortillas prepared from nixtamalized quality protein maize enriched with soybean. *Applied Food Research* 4:100383, <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100383>
- Hernández-Villaseñor L. A., S. Hernández-Estrada, V. M. Gómez-Rodríguez, H. Ramírez-Vega, Z. Villagrán, A. Ortega-Martínez, ... and L. M. Anaya-Esparza (2025) Comparison of the nutritional, physicochemical, technological-functional, and structural properties and antioxidant compounds of corn kernel flours from native Mexican maize cultivated in Jalisco highlands. *Crops* 5:26, <https://doi.org/10.3390/crops5030026>
- Langyan S., R. Bhardwaj, J. Kumari, S. R. Jacob, I. S. Bisht, S. R. Pandravada, and J. C. Rana (2022) Nutritional diversity in native germplasm of maize collected from three different fragile ecosystems of India. *Frontiers in Nutrition* 9:903759, <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.812599>
- Luga M., V. D. Ávila A., T. M. González M. and S. Mironeasa (2019) Consumer preferences and sensory profile related to the physico-chemical properties and texture of different maize tortillas types. *Foods* 8:533, <https://doi.org/10.3390/foods8110533>
- Makkar H. P. S., K. Becker, F. Sporer and M. Wink (1997) Studies on nutritive potential and toxic constituents of different provenances of *Jatropha curcas*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45:3152-3157, <https://doi.org/10.1021/jf970036j>
- Martínez-Herrera J., P. Siddhuraju, G. Francis, G. Dávila-Ortiz and K. Becker (2006) Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chemistry* 96:80-89, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.059>
- Nieves-Hernández M. G., B. L. Correa-Piña, O. García-Chavero, S. Lopez-Ramírez, R. Florez-Mejía, O. Y. Barrón-García, ... and M. E. Rodríguez-García (2024) Indirect fortification of traditional nixtamalized tortillas with nixtamalized corn flours. *Foods* 13:4082, <https://doi.org/10.3390/foods13244082>
- Oluwadiran O. O., O. P. Sobukola, F. O. Henshaw and W. A. O. Afolabi (2025) Effect of processing methods on quality characteristics of maize flour. *Proceedings* 118:3, <https://doi.org/10.3390/proceedings2025118003>
- Ortega P. R. (2021) Exploraciones etnobotánicas para conocer la diversidad de maíces nativos de México. In: Estudios de Diversidad, Conservación *in situ* y Mejoramiento de Maíces Nativos en México. R. Ortega-Paczka (ed.). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. pp:39-54.
- Palacios-Fonseca A. J., C. Vazquez-Ramos and M. E. Rodríguez-García (2009) Physicochemical characterizing of industrial and traditional nixtamalized corn flours. *Journal of Food Engineering* 93:45-51, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.12.030>
- Ramírez V. P., R. Ortega P., A. López H., F. Castillo G., M. Livera M., F. Rincón S. y F. Zavala G. (2000) Recursos Fitogenéticos de México para la Alimentación y la Agricultura. Informe Anual. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas-Sociedad Mexicana de Fitogenética, A. C. Chapingo, México. 188 p.
- Ramírez-Rivera E. J., G. Hernández-Salinas, J. Armida-Lozano, C. A. Guerrero-Ortiz, J. Valdivia-Sánchez, A. Llaguno-Aguinaga, ... y A. Cabal-Prieto (2024) Composición proximal y preferencia de consumidores de tortillas artesanales de Las Altas Montañas del Estado de Veracruz. *Agro-Divulgación* 4:17-20, <https://doi.org/10.54767/ad.v4i3.317>
- Rojo-Gutiérrez E., L. X. López-Martínez, J. M. Tirado-Gallegos, J. J. Buenrostro-Figueroa, H. S. García and R. Baeza-Jiménez (2025) Fortified maize tortilla: from the traditional Mesoamerican diet to functional food. *Biotechnia* 27:e2269, <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v27.2269>
- Rohlf F. J. (2009) NTSYSpc: Numerical Taxonomy System, ver. 2.21c. Exeter Software. Setauket, New York, USA.
- RStudio Team (2019) RStudio: Integrated Development Environment for R. *Journal of Open Source Software* 4:1686, <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Salinas M. Y., V. Hernández M., L. I. Trejo T., J. L. Ramírez D. y O. Íñiguez G (2017) Composición nutricional y de compuestos bioactivos en tortillas de poblaciones nativas de maíz con grano azul/morado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:1483-1496, <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.525>
- SIEGVER, Sistema de Información Estadística del Estado de Veracruz (2023) Cuadernillos Municipales: Coetzala. Veracruz, México. Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica /Secretaría de Finanzas y Planeación. Xalapa, Veracruz, México. 13 p. https://cieg.gobiernodigital.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/Coetzala.CM_Ver_2023.2.pdf (Julio 2025).
- Valdes-Rodriguez O. A., O. Sanchez-Sanchez, A. Perez-Vazquez and J. Caplan (2013) The Mexican non-toxic *Jatropha curcas* L. food resource or biofuel? *Ethnobotany Research and Applications* 11:1-7.