

Efecto del secado por aspersión en frío sobre las propiedades fisicoquímicas, térmicas, de pasta y de flujo de polvos de harina de maíz

Effect of spray-freeze-drying on the physicochemical, thermal, pasting and flow properties of nixtamalized corn flour powders

Blanca Aurora Francisco-Ponce¹, Javier Jiménez-Hernández^{1,2}, Yanik I. Maldonado-Astudillo^{1,2}, Gerónimo Arámbula-Villa³, Verónica Flores-Casamayor³, Ricardo Salazar^{4*} ✉

¹ Facultad de Ciencias Químico-Biológicas. Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas S/N. Ciudad Universitaria Sur, Col. La Haciendita, 39090. Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México.

² Centro de Innovación, Competitividad y Sostenibilidad (CICS). Universidad Autónoma de Guerrero. Calle Pino S/N Col. El Roble, 39640. Acapulco, Guerrero, México.

³ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV IPN), Unidad Querétaro, Libramiento Norponiente # 2000, Fraccionamiento Real de Juriquilla, 76230. Querétaro, Querétaro, México.

⁴ SECIHTI-Universidad Autónoma de Guerrero, Av. Javier Méndez Aponte No. 1, Fracc. Servidor Agrario, 39070. Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México.

RESUMEN

En este estudio se evaluó el efecto del secado por aspersión en frío sobre las propiedades fisicoquímicas, térmicas, de pasta y de flujo de harinas de maíz nixtamalizado, así como en la calidad tecnológica de la masa y la tortilla. La harina tratada con nitrógeno líquido (HNC) presentó una reducción significativa en humedad y actividad de agua, acompañado de mayor índice de solubilidad y absorción, lo que favoreció su rehidratación y estabilidad. Los análisis por FT-IR y difracción de rayos X revelaron desorden estructural y disminución en la cristalinidad, mientras que la calorimetría diferencial y los perfiles viscoamilográficos evidenciaron menor entalpía de gelatinización y retrogradación. Estas modificaciones estructurales se reflejaron en una mayor porosidad y mejor flujo de polvo, con reducción del índice de cohesividad. En términos tecnológicos, la masa elaborada con HNC mostró mayor adhesividad y cohesividad, generando tortillas más suaves, extensibles y con menor resistencia a tensión y corte, además de mayor rendimiento. En conclusión, la aspersión en frío constituye una alternativa tecnológica eficaz para optimizar las propiedades funcionales de la harina nixtamalizada y prolongar la suavidad de la tortilla.

Palabras clave: Líquidos criogénicos, nixtamalización, almidón, propiedades funcionales, tortilla.

ABSTRACT

This study assessed the effect of spray-freeze-drying on the physicochemical, thermal, pasting, and flow properties of nixtamalized corn flours, as well as on dough and tortilla quality. The flour treated with liquid nitrogen (HNC) showed a significant reduction in moisture and water activity, together with higher solubility and water absorption indexes, enhancing rehydration and stability. FT-IR and X-ray diffraction analyses revealed structural disorder and reduced crystallinity, while differential scanning calorimetry and pasting profiles evidenced lower gelatinization enthalpy and retrogradation.

These structural changes resulted in increased porosity and improved powder flowability, with reduced cohesiveness index. Technologically, dough from HNC exhibited higher adhesiveness and cohesiveness, producing softer and more extensible tortillas with lower tensile and cutting forces, along with higher yield. In conclusion, spray freezing emerges as an effective technological strategy to optimize the functional properties of nixtamalized flour and extend tortilla softness.

Keywords: Cryogenic liquids, nixtamalization, starch, functional properties, tortilla.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el maíz (*Zea mays* L.) destaca como uno de los cereales de mayor volumen de producción, y constituye la base alimentaria de millones de personas desde tiempos prehispánicos, particularmente en Centroamérica (Basilio-Cortés *et al.*, 2019). En México, este cultivo representa un pilar económico, social y cultural: de acuerdo con datos oficiales del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), la producción total anual de maíz en México (suma de ciclos Primavera-Verano y Otoño-Invierno) supera los 25 millones de toneladas, lo que evidencia la relevancia del cultivo dentro del sector agroalimentario nacional. Su relevancia nutricional es destacable, pues aporta carbohidratos, proteínas, vitaminas, minerales, lípidos y almidón no digerible, convirtiéndolo en un alimento completo (Escalante-Aburto *et al.*, 2020).

La composición estructural del grano de maíz incluye el pericarpio, pedicelo, endospermo y germen, siendo este último rico en lípidos, mientras que el endospermo concentra carbohidratos y proteínas (Flores-Farías *et al.*, 2018). Su principal componente es el almidón, constituido por amilosa y amilopectina, polisacáridos responsables del mayor aporte calórico y cuya organización en gránulos permite fenómenos como la gelatinización al someterse a tratamientos hidrotérmicos (Santiago-Ramos *et al.*, 2015).

*Autor para correspondencia: Ricardo Salazar

Correo-e: rsalazarlo@secihtl.mx

Recibido: 30 de octubre de 2025

Aceptado: 4 de febrero de 2026

Publicado: 25 de febrero de 2026

El proceso de nixtamalización, caracterizado por un tratamiento térmico alcalino, constituye una práctica ancestral que mejora la calidad nutricional del maíz y facilita la obtención de productos derivados, entre ellos la tortilla (Villada *et al.*, 2017). Durante este procedimiento, el grano experimenta transformaciones termoalcalinas, termomecánicas y térmicas adicionales que modifican las propiedades funcionales de la masa y de los productos finales. Dichos cambios se reflejan, particularmente, en el almidón, el cual sufre al menos tres etapas de gelatinización distintas, además de que mejora la disponibilidad de aminoácidos esenciales y la digestibilidad de las proteínas. El proceso de nixtamalización comprende tres etapas principales: 1) la cocción alcalina del grano en una solución de hidróxido de calcio, 2) el reposo o remojo del maíz cocido en el mismo medio alcalino, durante el cual ocurren transformaciones termoalcalinas y de difusión, y 3) la molienda del nixtamal para la obtención de masa o harina (Argun y Doğan, 2017; Amador-Rodríguez *et al.*, 2020).

En la actualidad, la harina de maíz nixtamalizado ha adquirido relevancia frente al nixtamal tradicional, debido a ventajas como su practicidad, menor tiempo de preparación, reducción en el consumo energético y ausencia de residuos contaminantes (Flores-Farías *et al.*, 2000). Su consumo anual per cápita en México es de aproximadamente 80 kg, y se utiliza en la elaboración de diversos productos como tortillas, tamales y botanas (Félix-Sámano *et al.*, 2025). Sin embargo, con el fin de mejorar sus propiedades funcionales y tecnológicas, se han explorado tratamientos físicos que alteren la conformación estructural de los componentes sin modificar su composición química (Ishwarya *et al.*, 2015).

Entre las tecnologías emergentes aplicadas a polvos alimenticios, la aspersión en frío (spray freezing) ha mostrado resultados promisorios. Este método combina atomización, congelación y secado para favorecer la formación de partículas más homogéneas, con modificaciones en tamaño, distribución y densidad, impactando en propiedades como cohesividad, solubilidad, absorción de agua y estabilidad de compuestos bioactivos (Romero-Luna *et al.*, 2018; Pascual-Pineda *et al.*, 2022). Además, se ha documentado que su aplicación en matrices como proteína de soya o almidón de maíz induce nanoestructuración, generando cavidades de menor tamaño y ordenamiento molecular, lo que mejora la retención de humedad y la conservación de características fisicoquímicas (Miñon-Hernández *et al.*, 2018; Acosta-Domínguez *et al.*, 2021).

La tortilla, alimento básico en la dieta mexicana, constituye alrededor del 70 % de la ingesta calórica diaria en el país y alcanza una producción anual de aproximadamente ≈ 12 millones de toneladas y un consumo per cápita de 80 kg (Félix-Sámano *et al.*, 2025). Su calidad depende de características como elasticidad, cohesividad y contenido de humedad, factores determinados tanto por la variedad del grano como por los parámetros de nixtamalización empleados (Méndez-Albores *et al.*, 2014). Se consideran atributos de una tortilla de calidad la suavidad, la plasticidad y la facilidad para enrollarse sin agrietarse, propiedades estrechamente ligadas a los

cambios estructurales del almidón y las proteínas durante el procesamiento (Arámbula-Villa *et al.*, 2004; Salinas-Moreno *et al.*, 2018).

La aplicación de la aspersión en frío permite inducir modificaciones estructurales en la matriz almidón-proteína de la harina de maíz nixtamalizado mediante procesos de congelamiento ultrarrápido y secado por sublimación. Estas condiciones favorecen la formación de una microestructura más porosa y menos ordenada, lo que incrementa la accesibilidad del agua y modifica las interacciones entre los componentes del sistema. Como resultado, se observan mejoras en propiedades funcionales y tecnológicas de la harina, así como en su desempeño durante la formación de masa y la elaboración de tortilla. En este contexto, la viabilidad del proceso radica en su potencial para generar cambios controlables y reproducibles en la funcionalidad de la harina. Por lo tanto, es necesario profundizar en el estudio de los efectos de la aspersión en frío sobre sus propiedades fisicoquímicas y reológicas de la harina de maíz nixtamalizado, con el fin de establecer bases científicas sólidas que permitan su eventual escalamiento a nivel industrial. En este contexto, el presente trabajo aborda el efecto del secado por aspersión en frío sobre las propiedades funcionales de la harina de maíz nixtamalizado y tortilla, considerando la relevancia que este tratamiento puede tener en la mejora del comportamiento estructural, fisicoquímico y tecnológico de la tortilla de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue de tipo experimental, se utilizó la variedad comercial de maíz híbrido *Pioneer 4082W* adquirida en el mercado local de Chilpancingo de los Bravo, Gro. para la producción de harina, e hidróxido de calcio de grado alimenticio (Caltek). El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar, considerando dos tratamientos: 1) harina de maíz nixtamalizado (HN) sin tratamiento criogénico, utilizada como control, y 2) harina de maíz nixtamalizado sometida al proceso de aspersión en frío con nitrógeno líquido, denominada HNC. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

Todos los reactivos empleados fueron de grado analítico y adquiridos de J.T. Baker® (Thermo Fisher Scientific Inc; Madrid, España), Golden Bell® (Golden Bell Inc; CA, EE. UU.), Sigma Chemical Co. (MO, USA) y Merck (Darmstadt, Germany). *Elaboración de harina de maíz nixtamalizado (HN)*. La harina de maíz se elaboró de acuerdo con el procedimiento descrito por Calderón-Peralta *et al.* (2017) y Francisco-Ponce *et al.* (2024). En este proceso 4 kg de maíz enteros se sometieron a una cocción alcalina en una solución al 1 % de cal (Ca(OH)_2) durante 30 min a una temperatura de 92 °C y posterior a la cocción alcalina, el nixtamal se dejó en reposo durante 16 h a temperatura ambiente (25 ± 1 °C), permitiendo su enfriamiento gradual y la continuación de los procesos de difusión y transformación termoalcalina. Se descartó el nejayote y el maíz se lavó con 8 L de agua. El maíz lavado se molió para obtener masa y posteriormente se colocó en un horno de secado a 40 °C durante 24 h, se molió y tamizó con una malla

de acero inoxidable con un tamaño de poro de 0.25 mm (modelo DN20MESHXXX, JPLAB) y se almacenó en bolsas herméticas a 25 ± 1 °C. Previo a su almacenamiento, la harina de maíz nixtamalizado presentó un contenido de humedad del 10 %, valor típico para harinas nixtamalizadas destinadas a su conservación y posterior análisis.

Aspersión en frío (HNC). Se colocó una solución al 25 % en peso de harina en una bomba de aspersión, se presurizó y se asperjó sobre nitrógeno líquido (YDS 50B-125), posteriormente se recuperó y liofilizó en recipientes de vidrio que se acoplaron en un equipo Free Zone 4.5 L (Labconco, Kansas, EE.UU.) en condiciones de vacío de 0.045 mBar a una temperatura de -50 °C.

Análisis químico proximal. Se determinó el contenido de proteína, extracto etéreo, cenizas, contenido de humedad y se calculó por diferencia el contenido de carbohidratos de la harina de maíz nixtamalizado de cada tratamiento utilizando métodos oficiales de la Asociación Americana de Químicos de Cereales (AACC, 2017).

Color y actividad de agua. El color y la actividad de agua se determinaron de acuerdo con los métodos descritos por León-Villalobos *et al.* (2023).

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR). Se utilizó FT-IR para evaluar las bandas vibratorias de enlaces y grupos funcionales presentes en cada muestra de acuerdo con la metodología empleada por Santiago-Ramos *et al.* (2018), utilizando un espectrómetro Bruker Alpha Platinum ATR (Brucker Co., EE. UU.), con una resolución de 4 cm^{-1} en un rango espectral de 4000 a 400 cm^{-1} . Las muestras secas ($<10 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de humedad) se analizaron directamente presionándolas sobre el vidrio del equipo.

Difracción de rayos X (XRD). Para determinar los planos cristalinos de la harina se utilizó la metodología empleada por Francisco-Ponce *et al.* (2024) utilizando un difractómetro de rayos-X de geometría BRAGG-BRENTANO 0/20 SIEMENS D-500. El equipo operó con radiación K α del cobre ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$), a 40 kV y 30 mA, incorporando un monocromador secundario de grafito. La abertura de divergencia se fijó en 0.3°, mientras que la abertura de recepción fue de 0.05°. Se efectuaron barridos en el intervalo de 4° a 60°, con un tamaño de paso de 0.05° y una duración de medida de 10 s por cada paso.

Perfil viscoamilográfico (RVA). Las pruebas de viscosidad se realizaron con un Micro Viscoamilografo (3D Newport Scientific Pty., Ltd., Warriewood, NSW, Australia), aplicando la metodología reportada por Calderón-Peralta *et al.* (2017). Se registraron la viscosidad máxima, la viscosidad final y la viscosidad de retrogradación, expresadas en centipoise (cP), así como la temperatura de pasta y la temperatura de pico, expresadas en grados Celsius (°C).

Calorimetría diferencial de barrido (DSC). Para determinar las transiciones de fase de la harina se utilizó un equipo DSC (Mettler-Toledo®, modelo 821e, Suiza) de acuerdo con lo descrito por Suastegui-Baylón *et al.* (2021). Se registraron las temperaturas de inicio (To), pico (Tp) y final (Tf) de gelatinización, expresadas en grados Celsius (°C), así como la entalpía

de gelatinización (ΔH), expresada en joules por gramo ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$). **Morfología.** El estudio de la morfología de la HN y HNC se realizó con un Microscopio Electrónico de Escaneo Ambiental (ESEM, Philips XL30), utilizando un haz de 3 kV y un detector gaseoso de electrones secundarios, conforme a lo indicado por Acosta-Domínguez *et al.* (2021). Las imágenes se capturaron a aumentos de 1,500 y 1,600 X y a una presión de 1 Torr. Previamente, las muestras se recubrieron con grafito en un pulverizador JFC-1100 (JEOL, Akishima, Japón).

Propiedades de flujo de polvos. Las propiedades de flujo de polvos se determinaron de acuerdo con lo descrito por Abebe y Ronda (2015) y Francisco-Ponce *et al.* (2024). Se registraron como variables experimentales la fuerza de apelmazamiento (N) y el índice de cohesividad ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$), los cuales se emplearon para describir el comportamiento de flujo de las harinas analizadas.

Adhesividad y cohesividad de masa. Se rehidrató harina con agua en una proporción 1:1 para obtener masa con una consistencia adecuada, se utilizó el método descrito por Arámbula-Villa *et al.* (2001).

Elaboración y rendimiento de tortilla. Se elaboraron tortillas con una prensa manual, el diámetro de la tortilla fue de 15 cm y el grosor de 0.5 cm, se registró la cantidad de tortillas elaboradas por cada 100 g de harina utilizada, con estos datos se calculó el porcentaje de rendimiento de cada tratamiento. **Fuerza a la tensión y corte.** Para determinar la fuerza a la tensión y corte se utilizaron los métodos propuestos por Arámbula-Villa *et al.* (2004) y Francisco-Ponce *et al.* (2024). Para la determinación de la fuerza a la tensión y de corte, se utilizaron dos tipos de testales obtenidos a partir de tortillas: 1) testales de forma rectangular, con dimensiones de 8.7 cm de longitud y 3.75 cm de ancho, y 2) testales tipo probeta, con una longitud total de 8.7 cm, un ancho de 3.75 cm en los extremos y una sección central reducida de 1.5 cm de ancho. La resistencia mecánica de las tortillas se evaluó registrando la fuerza máxima requerida en cada ensayo. Ambas variables se expresaron en newtons (N) y se utilizaron como indicadores de la suavidad, extensibilidad y resistencia estructural de la tortilla.

Análisis de resultados. Las pruebas se realizaron por triplicado y fueron procesados en términos de media y desviación estándar ($\text{Media} \pm \text{DS}$). Para el análisis estadístico se aplicó una prueba t de Student con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$), mediante el programa GraphPad Prism (v. 6.0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Harina: composición, disponibilidad de agua y estabilidad

La composición química de las harinas se muestra en la Tabla 1. La composición proximal de las harinas concuerda con lo reportado por Álzate Carvajal *et al.* (2013) para granos de maíz blanco similares a los utilizados en este estudio, donde el componente mayoritario son los carbohidratos, seguidos de las proteínas y por último de las grasas. Se observaron diferencias significativas en el contenido de cenizas, humedad, proteínas y carbohidratos. La harina tratada por aspersión

Tabla 1. Composición proximal en base seca de las harinas de maíz nixtamalizado.**Table 1.** Proximate composition on a dry basis of nixtamalized corn flours.

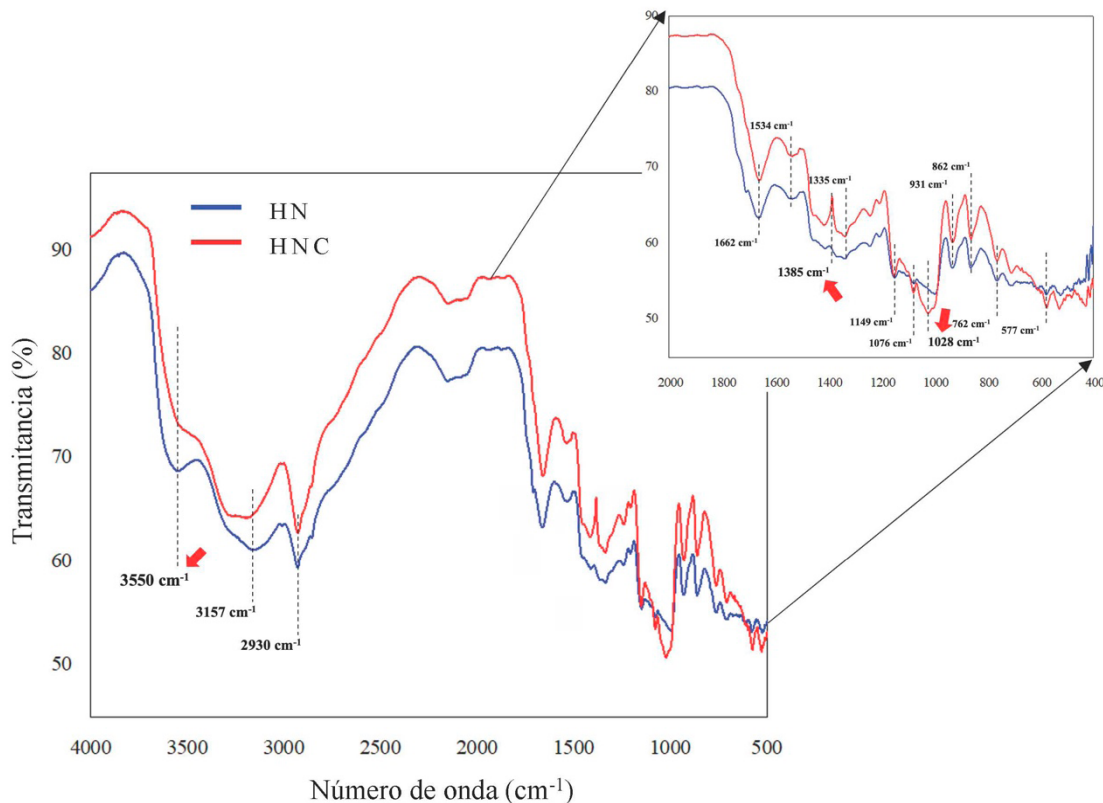
Tratamiento	Parámetros (%)				
	Cenizas	Humedad	Proteínas	Carbohidratos	Grasas
HN	1.16 ± 0.07	9.32 ± 0.01	7.44 ± 0.02	84.08 ± 0.1	4.31 ± 0.05
HNC	1.36 ± 0.01*	1.87 ± 0.2*	7.60 ± 0.05*	88.07 ± 0.1*	4.23 ± 0.06

HN: harina de maíz nixtamalizado control; **HNC:** harina de maíz nixtamalizado tratada por aspersión en frío. Los valores son reportados como medias y desviación estándar. Valores con asterisco (*) dentro de la misma columna indican diferencia significativa ($p < 0,05$), mediante el test de t de Student.

en frío con nitrógeno líquido (HNC) presentó una humedad significativamente menor que la harina control (HN). La aspersión en frío con nitrógeno líquido genera polvos con baja humedad porque al atomizar la suspensión en contacto con nitrógeno a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, las gotas se congelan de forma instantánea evitando que retengan agua líquida; luego, la rápida evaporación del nitrógeno arrastra humedad y favorece la sublimación del hielo atrapado, mientras que la inercia química del gas impide la incorporación de vapor externo, y la solidificación súbita produce partículas finas con gran superficie que facilitan la eliminación del agua residual, dando como resultado un polvo seco y estable (Ishwarya *et al.*, 2015). Estos resultados contrastan con lo reportado con otros autores como Miñon-Hernández *et al.* (2018) e Ishwarya *et al.* (2015). De manera consistente, la actividad de agua (a_w) fue significativamente baja en HNC respecto de HN. En términos

de inocuidad y vida útil, valores bajos de a_w ofrecen un amplio margen de estabilidad para almacenamiento y distribución de harinas instantáneas (Pascual-Pineda *et al.*, 2022).

La Figura 1 muestra el análisis por FT-IR de las harinas. El análisis espectroscópico evidenció cambios compatibles con exposición de grupos hidroxilo y desorden estructural a corto alcance, propios de la modificación criogénica. Los gránulos de almidón contenidos en la harina son insolubles en agua fría, pero se hinchan cuando se calientan en un medio acuoso, y estos constan de dos tipos de interacción con agua diferentes según su ubicación: en los gránulos de almidón pueden distinguirse dos tipos de agua en función de su grado de interacción: 1) agua estructural, asociada a la red de enlaces de hidrógeno dentro de las regiones cristalinas, y 2) agua de hidratación, más móvil, localizada principalmente en las regiones amorfas y responsable de los procesos de

**Figura 1.-** Espectro de infrarrojo de las muestras de harina control (HN) y tratada por aspersión en frío (HNC).**Figure 1.-** Infrared spectrum of control (HN) and spray freezing (HNC) flour samples.

hinchamiento (Amador-Rodríguez *et al.*, 2020). En el análisis FT-IR el primer tipo de agua se observó en la vibración localizada a 3550 cm^{-1} , que está asociado con el estiramiento de enlaces O-H; HNC muestra una menor intensidad de esta señal, lo que puede relacionarse con su bajo contenido de humedad y a_w . El segundo tipo de agua se observa en los estiramientos en 2100 cm^{-1} en todos los tratamientos. Las vibraciones localizadas a 3157 cm^{-1} y 2930 cm^{-1} están asociadas a estiramientos de enlaces C-H. En la huella digital de la harina (región 1500 cm^{-1} – 600 cm^{-1}) la vibración localizada a 1149 cm^{-1} está asociada a estiramientos de enlaces C-O-H y C-O-C de enlaces glucosídicos, y la vibración localizada a 1076 cm^{-1} está asociada a estiramientos de enlaces C-O y C-C, así como flexiones de enlaces C-O-H de la glucosa, relacionado con las regiones amorfas y cristalinas del almidón. Los picos restantes localizados en la huella digital están asociados al estiramiento de enlaces simples C-O, C-C y C-O-H, que están presentes en la estructura de los carbohidratos, principalmente glucosa, como lo reportado por Suastegui-Baylón *et al.* (2021). En HNC se presentó una vibración más pronunciada en comparación con HN localizado a 1385 cm^{-1} , que está asociado con el estiramiento de enlaces O-H propio de enlaces en carbohidratos, lo que sugiere una mayor biodisponibilidad de carbohidratos simples derivados a partir de la destrucción parcial de la matriz polimérica (Morales *et al.*, 2021). La destrucción parcial de la matriz polimérica observada en la harina tratada por aspersión en frío (HNC) puede atribuirse al congelamiento ultrarrápido de la suspensión en contacto con nitrógeno líquido ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), seguido del proceso de liofilización. La formación instantánea de cristales de hielo dentro de la matriz compuesta por almidón, proteínas y lípidos genera tensiones mecánicas internas que debilitan las interacciones no covalentes, principalmente enlaces de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas, responsables de la cohesión estructural del sistema. Posteriormente, durante la sublimación del hielo, se originan cavidades y poros que contribuyen a la desorganización parcial de la matriz polimérica (Acosta-Domínguez *et al.*, 2021).

La Tabla 2 muestra las propiedades físicas de color, así como fisicoquímicas de las harinas. En las propiedades de color se observaron cambios en la luminosidad, donde HNC tiene una mayor en comparación con HN. Esto puede atribuirse a la modificación física aplicada, que incluye con-

gelación, sublimación y secado, ya que las propiedades de color generalmente dependen del tamaño, forma, y grosor de los gránulos (Sahai *et al.*, 2001). Los parámetros físicos de color (luminosidad, cromaticidad y matiz) mostraron una tendencia hacia un color más amarillo, claro y grisáceo, características que pueden relacionarse con un polvo más fino, indicio de una mayor molienda en HNC (Romero-Luna *et al.*, 2018). En cuanto a propiedades fisicoquímicas, HNC mostró un mayor índice de solubilidad en agua (ISA), mientras que el índice de absorción de agua (IAA) fue ligeramente superior. El IAA es un indicador de rendimiento y un criterio de calidad de la harina, cuya magnitud está asociada con la cantidad de grupos hidrofílicos disponibles y con la capacidad gelificante de sus macromoléculas (Flores-Farías *et al.*, 2000). El valor reportado de IAA para harinas comerciales de México es de 2.1 a $3.7\text{ g gel}\cdot\text{g}^{-1}$ muestra (Bressani, 1990). El IAA aumentó en HNC, lo que indica una mayor capacidad de hinchamiento de los gránulos de almidón, esto a consecuencia de la alteración de la estructura de la red interna de polisacáridos dentro del gránulo, lo que permite la internalización de una mayor cantidad de moléculas de agua y consecuentemente un mayor hinchamiento (Argun y Doğan, 2017). Si bien el menor contenido de humedad de la harina tratada por aspersión en frío (HNC) puede favorecer la absorción inicial de agua debido a un mayor gradiente de humedad, este factor por sí solo no explica completamente el incremento observado en el índice de absorción y solubilidad. El proceso de aspersión en frío y liofilización induce una microestructura más porosa y desordenada, con mayor área superficial efectiva y mayor exposición de grupos hidrofílicos en la matriz proteico-almidón (Miñon-Hernández *et al.*, 2018). También el índice de solubilidad aumentó en HNC en comparación con HN; este fenómeno está relacionado con la lixiviación de cadenas de amilosa presentes en el gránulo de almidón, las cuáles se escindieron a consecuencia de la alteración de la superficie del gránulo. Los gránulos de almidón están organizados de forma concéntrica conformados por dominios amorfos y cristalinos dispuestos en anillos, creando un ambiente semicristalino (Janve *et al.*, 2013). Aunque la congelación con nitrógeno líquido seguida de liofilización es una tecnología ampliamente reconocida por su capacidad para preservar las propiedades químicas y funcionales de los alimentos, este tratamiento puede inducir modificaciones físicas en la

Tabla 2. Características físicas evaluadas de las harinas control (HN) y tratada por aspersión en frío (HNC).
Table 2. Physical characteristics evaluated in control (HN) and spray freezing (HNC) flours.

Tratamiento	Luminosidad (L*)	Croma (C*)	Matiz (H°)	ISA (g sólido/100 g muestra)	IAA (g gel/g muestra)	Actividad de agua (a_w)
HN	50.83 ± 2.2	8.77 ± 0.5	93.67 ± 0.4	5.11 ± 0.001	2.28 ± 0.2	0.331 ± 0.1
HNC	$59.81 \pm 0.3^*$	$6.46 \pm 0.2^*$	$96.68 \pm 0.3^*$	$6.30 \pm 0.001^*$	2.47 ± 0.1	$0.071 \pm 0.1^*$

HN: harina de maíz nixtamalizado; **HNC:** harina de maíz nixtamalizado tratada por aspersión en frío. **IAA:** Índice de Absorción en Agua; **ISA:** Índice de Solubilidad en Agua. Los valores son reportados como medias y desviación estándar. Valores con asterisco (*) dentro de la misma columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante el test de t de Student.

microestructura del material. El congelamiento ultrarrápido favorece la formación instantánea de cristales de hielo que generan tensiones mecánicas dentro de la matriz proteína-almidón, mientras que la sublimación posterior del hielo durante la liofilización origina cavidades y poros. Estos efectos físicos provocan una desorganización parcial de la matriz polimérica, sin implicar degradación química de sus componentes (Pascual-Pineda *et al.*, 2019). Se infiere que el proceso de congelación-secado aplicado daña la matriz polimérica en la que están sumergidos los gránulos, solubilizándose las proteínas presentes en ella, así como otros compuestos solubles (Bressani, 1990).

En conjunto, menor humedad y a_w , junto con mayor ISA, favorecen la rehidratación rápida y la estabilidad fisicoquímica del polvo, atributos que impactan positivamente la consistencia de la masa en proceso continuo. La literatura ha mostrado que los tratamientos criogénicos en polvos alimenticios tienden a incrementar la solubilidad, reducir la cristalinidad y aumentar la porosidad del almidón, lo cual coincide con los resultados observados en HNC (Fournaise *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2021; Huerta-Vera *et al.*, 2025).

Estructura cristalina y transiciones térmicas

La Figura 2 muestra los difractogramas de rayos X de las harinas. El análisis cristalográfico permitió identificar espaciamientos interplanares característicos del patrón tipo A (5.86, 5.15, 4.89, 4.45 y 3.84 Å), calculados a partir de los picos de difracción obtenidos en el intervalo de 2θ entre 16 y 24°, los cuales corresponden a las reflexiones reportadas para almidones de maíz, asociadas comúnmente a picos alrededor de 15, 17, 18 y 23°. Se observa que HN y HNC mostraron el patrón tipo A característico de almidones de cereales, los picos presentes concuerdan con lo reportado en estudios de Santiago-Ramos *et al.* (2015), donde se han asociado a diversos procesos: los picos localizados a 5.86 y 3.84 Å son característicos del patrón de tipo A de cereales como el maíz, y se asocian con la formación de hélices de amilosa; el pico a 4.45 Å está asociado a la formación de complejos de amilosa tras la cocción del maíz. Se observó una menor cristalinidad en HNC respecto a HN. Esta reducción concuerda con lo descrito en otros tratamientos mecánicos o criogénicos aplicados a almidones, donde se observa pérdida de orden y formación de cavidades debido al daño en la matriz polimérica de proteínas y grasas que empaqueta a los gránulos, así como

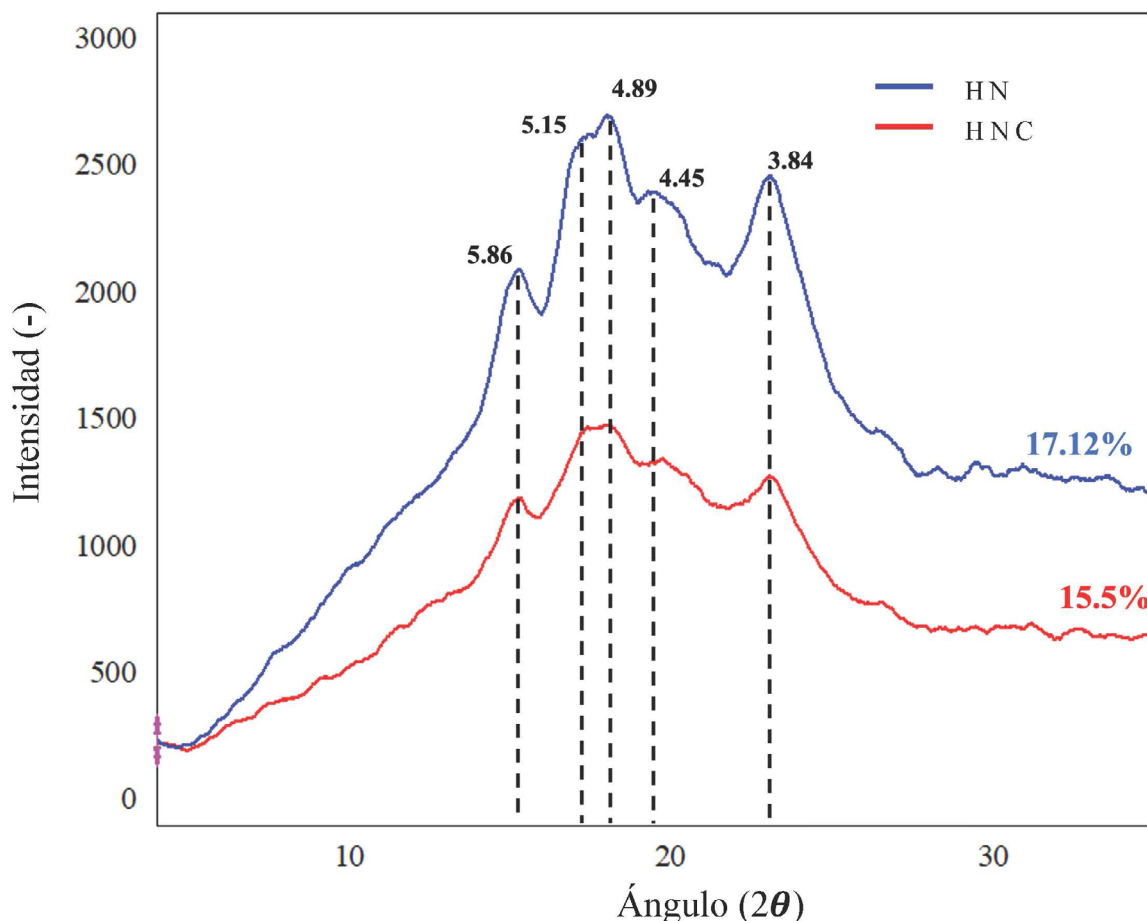


Figura 2. Difractogramas de rayos X de la harina control (HN) y tratada por aspersión en frío (HNC).
Figure 2. X-ray diffractograms of control (HN) and spray freezing (HNC) flour.

la probable lixiviación de las cadenas de amilosa que están relacionadas con las regiones cristalinas del almidón (Arp *et al.*, 2018; Miñon-Hernández *et al.*, 2018).

La Figura 3 muestra el perfil viscoamilográfico (RVA) de las harinas, HNC mostró menor viscosidad máxima, menor viscosidad final y, de manera importante, menor retrogradación en comparación con HN. Asimismo, la entalpía de gelatinización fue menor en HNC, lo que indica una red granular menos ordenada y que gelatiniza con mayor facilidad durante la cocción (Ma *et al.*, 2022). Estos hallazgos se asocian a una menor tendencia al endurecimiento de las tortillas durante el almacenamiento, lo que favorece su suavidad y extensibilidad. La temperatura de pasta y la temperatura de pico son parámetros asociados con el inicio del hinchamiento de los gránulos de almidón y con el punto máximo de desarrollo de la viscosidad durante el calentamiento, respectivamente. Un incremento en estos valores indica una mayor estabilidad térmica del sistema y una mayor resistencia de la estructura granular al calentamiento (Rojas-Molina *et al.*, 2007). En este estudio, las diferencias observadas entre HN y HNC sugieren que el tratamiento de aspersión en frío modifica la organización interna del almidón y su interacción con la matriz

proteico-lipídica, afectando la energía requerida para el inicio de la gelatinización y el desarrollo máximo de la viscosidad. Estos cambios son consistentes con la menor cristalinidad y entalpía de gelatinización observadas en HNC, y reflejan un comportamiento reológico diferenciado que impacta directamente en el desempeño tecnológico de la harina durante la formación de masa y la elaboración de tortillas (Cheng *et al.*, 2020).

Morfología y propiedades de flujo del polvo

La Figura 4 muestra las micrografías, evidenciando que HNC presenta una matriz con poros y cavidades que no se observan en HN, lo cual es característico de la nano- y microestructuración inducida por aspersión en frío (Pascual-Pineda *et al.*, 2019). Esta porosidad favorece la penetración de agua y el hinchamiento controlado durante la rehidratación (Barrera *et al.*, 2013). Las características morfológicas evidenciadas en las micrografías de los gránulos de almidón de HNC mostraron daños superficiales. Se observaron cambios en la matriz en la que están inmersas, compuesta por lípidos y proteínas. Asimismo, algunos gránulos fueron destruidos (Martínez-Bustos *et al.*, 2000). Esta matriz presentó múltiples cavidades

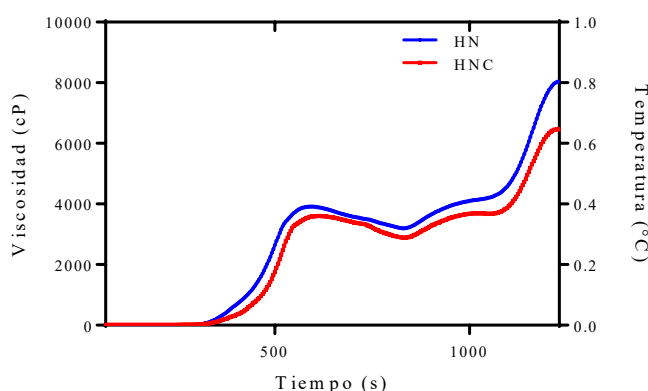


Figura 3.- Perfil viscoamilográfico de las harinas control (HN) y tratada por aspersión en frío (HNC).

Figure 3.- Viscoamylographic profile of the control (HN) and spray freezing (HNC) flours.

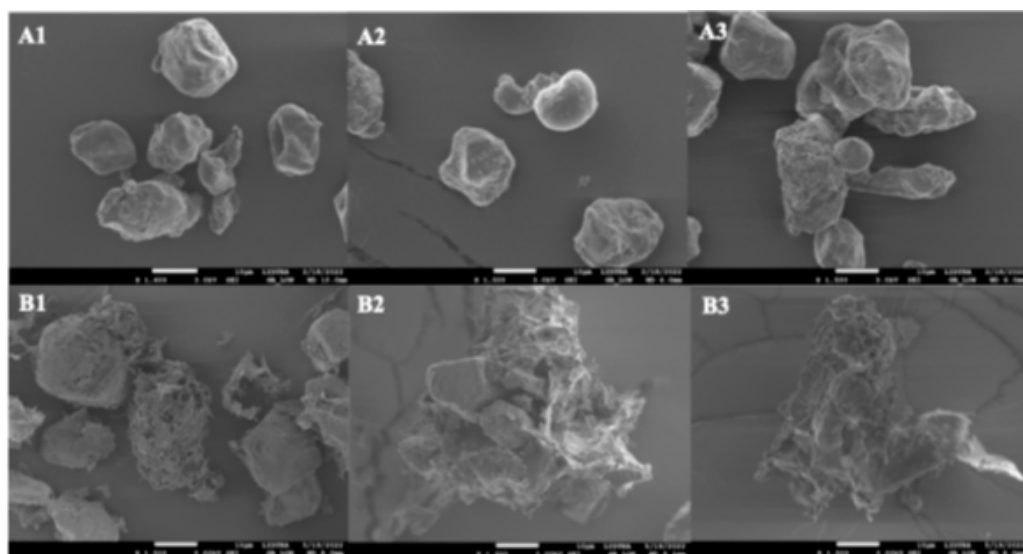


Figura 4.- Micrografías de los gránulos de almidón a 1500 y 1600 x. A) Harina control (HN); B) Harina tratada por aspersión en frío (HNC).

Figure 4.- Micrographs of starch granules at 1500 x. A) Control flour (HN); B) spray freezing flour (HNC).

y poros, y de acuerdo con los resultados obtenidos en este y otros estudios, estos cambios influyen directamente en su poder de hinchamiento y capacidad de retención de agua, como se observó en los resultados previos (Ishwarya *et al.*, 2015).

La Tabla 3 enlista las propiedades de apelmazamiento y cohesividad de las harinas estudiadas. A medida que disminuye el tamaño de partícula en un polvo alimenticio, las fuerzas de atracción entre partículas superan al peso de cada partícula individual, lo que confiere al material un carácter cohesivo y genera serias dificultades de flujo (Abu-hardan *et al.*, 2010); la aspersión en frío con nitrógeno líquido mejoró este parámetro y disminuyó en índice de cohesividad (de 19.14 a 15.27 N.m.g⁻¹). Se infiere que este efecto puede estar relacionado con la destrucción de algunos gránulos y la matriz polimérica, como se observa en las micrografías de HNC (Figura 4). La cohesividad y la adhesividad son parámetros clave para describir el comportamiento reológico de la masa. La cohesividad refleja la resistencia interna del sistema y su capacidad para mantener una estructura continua durante la deformación, mientras que la adhesividad se asocia con la tendencia de la masa a adherirse a superficies durante su manipulación (Landillon *et al.*, 2008). En este estudio, las diferencias observadas entre los tratamientos sugieren que la aspersión en frío modificó las interacciones entre los componentes de la matriz proteína-almidón, lo que se traduce en cambios tanto en la cohesividad como en la adhesividad de la masa. Estos efectos pueden impactar directamente en la manejabilidad de la masa y en su desempeño durante la elaboración de tortillas.

La Figura 5 muestra la dependencia a la velocidad de flujo de polvos de las harinas, donde se observa que HNC tiene una menor resistencia al flujo en comparación con HN, esto puede relacionarse con las fuerzas electrostáticas e hidrostáticas dadas entre las partículas se rompen por la cuchilla a medida que aumenta la velocidad (Abebe y Ronda, 2015).

En términos de ingeniería de procesos, HNC fue menos cohesiva que HN, con menor resistencia al flujo, lo que facilita la dosificación, el transporte y el mezclado industrial. Este comportamiento se atribuye a superficies más homogéneas y mayor área disponible para la interacción con el agua, lo que contrasta con lo observado en las micrografías (Zhang *et al.*, 2022). La dependencia a la velocidad de flujo observada puede explicarse por las modificaciones topológicas inducidas en la superficie de los gránulos de almidón tras la asper-

Tabla 3. Propiedades de flujo de polvos de la harina control (HN) y tratada por aspersión en frío (HNC).

Table 3. Powder flow properties of control (HN) and spray-freezing (HNC) flour.

Parámetros	Tratamiento	
	HN	HNC
Apelmazamiento (N)	2,776 ± 271.8	2,556.87 ± 412.7
Índice de cohesividad (N.m.g ⁻¹)	19.14 ± 0.3	15.27 ± 0.1*

HN: harina de maíz nixtamalizado; **HNC:** harina de maíz nixtamalizado tratada por aspersión en frío. Los valores son reportados como medias y desviación estándar. Valores dentro de la misma fila con asterisco (*) indican diferencia significativa ($p < 0,05$), mediante el test de t de Student.

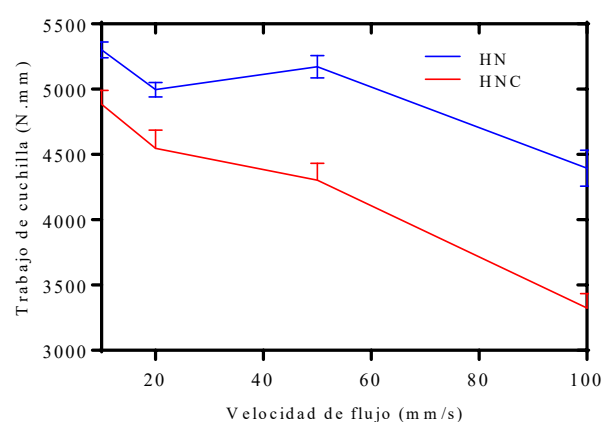


Figura 5. Dependencia a la velocidad de flujo de harina control (HN) y tratada por aspersión en frío (HNC).

Figure 5. Dependence on the flow rate of control flour (HN) and spray freezing flour (HNC).

sión en frío con nitrógeno líquido. Las micrografías (Figura 4) evidenciaron una mayor rugosidad superficial y la presencia de irregularidades y cavidades, lo cual incrementa el área de contacto efectivo entre partículas y favorece la generación de cargas electrostáticas superficiales durante el movimiento del polvo (Kamphorst *et al.*, 2023). Estas cargas pueden reducir la fricción interparticular y modificar las fuerzas de atracción y repulsión entre partículas, contribuyendo a un comportamiento de flujo dependiente de la velocidad. Este efecto ha sido previamente descrito en sistemas particulados donde la topografía superficial y la carga electrostática juegan un papel determinante en la dinámica de flujo (Doğan *et al.*, 2019).

Masa y tortilla: desempeño tecnológico y vínculos mecánicos

La Tabla 4 muestra las fuerzas de adhesividad y cohesividad de masas, así como la fuerza de tensión y corte de las tortillas hechas a partir de las harinas estudiadas. En la preparación de masa, el tratamiento HNC mostró mayor cohesividad y adhesividad que en el tratamiento HN, lo que indica interacciones partícula-agua más robustas y redes más integradas (Santiago-Ramos *et al.*, 2018). En la tortilla, HNC requirió menores fuerzas de tensión y de corte, lo que se traduce en láminas más suaves, extensibles y fáciles de enrollar. Estos parámetros están directamente relacionados con la calidad industrial de la tortilla, definida por su suavidad, elasticidad y facilidad para ser enrollada sin agrietarse. La menor retrogradación registrada en HNC anticipa una menor ganancia de firmeza por retrogradación durante el enfriamiento y almacenamiento, lo cual permite conservar la suavidad por más tiempo. Esta característica es esencial para mantener la aceptabilidad sensorial y la vida útil de la tortilla.

Modelo integrador de efecto tecnológico

Los resultados obtenidos permitieron proponer el siguiente mecanismo de mejora asociado a la aspersión en frío:

El secado criogénico uniforme reduce de manera significativa la humedad y la actividad de agua, aumentando la estabilidad y favorece la rápida rehidratación.

Tabla 4. Propiedades físicas y texturales de masa y tortilla evaluadas en harina control (HN) y tratada por aspersión en frío (HNC).
Table 4. Physical and textural properties of dough and tortilla evaluated in control (HN) and spray freezing (HNC) flour.

Tratamiento	Masa			Tortilla	
	Cohesividad (N)	Adhesividad (N)	Fuerza de tensión (N)	Fuerza de corte (N)	Rendimiento
HN	1.06 ± 0.1	0.14 ± 0.1	2.16 ± 0.3	14.01 ± 0.5	1.39 ± 0.04
HNC	1.33 ± 0.1*	0.18 ± 0.1*	1.87 ± 0.1*	11.80 ± 0.8*	1.47 ± 0.03*

HN: harina de maíz nixtamalizado; HNC: harina de maíz nixtamalizado tratada con nitrógeno líquido. Los valores son reportados como medias y desviación estándar. Valores en la misma columna con asterisco (*) indica diferencia significativa ($p < 0,05$), mediante el test de t de Student.

La porosidad inducida por el tratamiento por aspersión en frío altera la cristalinidad del almidón, disminuye la energía requerida para gelatinizar y facilita una mayor accesibilidad al agua.

La reorganización macromolecular propiciada por el tratamiento por aspersión en frío limita la retrogradación del almidón y favorece la formación de complejos de amilosa, lo que contribuye a mantener la suavidad y elasticidad de la tortilla durante su almacenamiento.

CONCLUSIONES

La aplicación del proceso de aspersión en frío con nitrógeno líquido seguida de liofilización en harina de maíz nixtamalizado indujo modificaciones estructurales y funcionales significativas sin alterar su composición química. El tratamiento HNC presentó menor humedad y actividad de agua, así como una microestructura más porosa y desorganizada, asociada con una reducción de la cristalinidad y de la entalpía de gelatinización.

Estas modificaciones estructurales se reflejaron en un mejor comportamiento funcional de la harina, evidenciado por una mayor capacidad de absorción y solubilidad en agua, un flujo de polvo dependiente de la velocidad y un desempeño tecnológico diferenciado en masa y tortilla. Aunque algunas variables no mostraron diferencias estadísticamente significativas, las tendencias observadas fueron consistentes con los cambios microestructurales inducidos por el tratamiento criogénico.

En conjunto, los resultados confirman que la aspersión en frío modifica la organización estructural del sistema almidón-proteína y mejora propiedades funcionales relevantes de la harina nixtamalizada.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a José Juan Véles Medina y Araceli Mauricio del CINVESTAV-Querétaro, por su asistencia técnica.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

REFERENCIAS

Abebe, W., Collar, C. y Ronda, F. 2015. Impact of variety type and particle size distribution on starch enzymatic hydrolysis and functional properties of tef flours, *Carbohydrate Polymers*. 115: 260–268.

Abebe, W. y Ronda, F. 2015. Flowability, moisture sorption and thermal properties of tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] grain flours. *Journal of Cereal Science*. 63: 14–20.

Abu-hardan, M. y Hill, S.E. 2010. Handling properties of cereal materials in the presence of moisture and oil. *Powder Technology*, 198(1): 16–24.

Acosta-Domínguez, L., Cocotle-Ronzón, Y., *et al.* 2021. Effect of a cryogenic treatment in the microstructure, functional and flow properties of soy protein isolate. *Food Hydrocolloids*. 119: 106871.

Acosta-Domínguez, L., Salazar, R., *et al.* 2021. Thermodynamic analysis as a useful tool to study the physical properties of sweet-potato starch films reinforced with alginate microparticles. *Polymer Composites*. 42(7): 3380–3390.

Álzate Carvajal, E.N., Quintero Castaño, V.D. y Lucas Aguirre, J.C. 2013. Determinación de las propiedades térmicas y composicionales de la harina y almidón de chachafruto (*Erytina edulis triana ex micheli*). *Temas Agrarios*. 18(2): 21.

Amador-Rodríguez, K.Y. *et al.* 2020. High-energy alkaline milling as a potential physical and chemical cornstarch ecofriendly treatment to produce nixtamalized flours. *International Journal of Biological Macromolecules*. 164: 3429–3437.

Arámbula-Villa, G. *et al.* 2004. Evaluación de una metodología para determinar características de textura de tortilla de maíz (*Zea mays* L.). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 54(2): 216–222.

Arámbula-Villa, G., González-Hernández, J. y Ordorica-Falomir, C.A. 2001. Physicochemical, structural and textural properties of tortillas from extruded instant corn flour supplemented with various types of corn lipids. *Journal of Cereal Science*. 33(3): 245–252.

Argun, M.Ş. y Doğan, İ.S. 2017. Effects of varying nixtamalization conditions on the calcium absorption and pasting properties of dent and flint corn flours. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3): e12436.

Arp, C.G., Correa, M.J. y Ferrero, C. 2018. High-amylose resistant starch as a functional ingredient in breads: a technological and microstructural approach. *Food and Bioprocess Technology*. 11(12): 2182–2193.

Barrera, G.N. *et al.* 2013. Evaluation of the mechanical damage on wheat starch granules by SEM, ESEM, AFM and texture image analysis. *Carbohydrate Polymers*. 98(2): 1449–1457.

Basilio-Cortés, U.A. *et al.* 2019. Effect of dual modification on the spectroscopic, calorimetric, viscosimetric and morphological characteristics of corn starch. *Polymers*. 11(2): 333.

Bressani, R. 1990. Chemistry, technology, and nutritive value of maize tortillas. *Food Reviews International*. 6(2): 225–264.

Calderón-Peralta, C.V. *et al.* 2017. Influence of *Hymenaea courbaril* gum as a new additive on nixtamalized flour

- properties and quality of tortilla. *Journal of Food Process Engineering*, 40(5): e12525.
- Cheng, W. *et al.* 2020. Effect of improved extrusion cooking technology on structure, physiochemical and nutritional characteristics of physically modified buckwheat flour: Its potential use as food ingredients. *LWT*. 133: 109872.
- Doğan, M. *et al.* 2019. Powder caking and cohesion behaviours of coffee powders as affected by roasting and particle sizes: Principal component analyses (PCA) for flow and bioactive properties. *Powder Technology*. 344: 222–232.
- Escalante-Aburto, A. *et al.* 2020. An update of different nixtamalization technologies, and its effects on chemical composition and nutritional value of corn tortillas. *Food Reviews International*. 36: 456–498.
- Félix-Sámano, A.L. *et al.* 2025. Nixtamalization and extrusion processes: effects on physicochemical, nutritional, and nutraceutical properties in the processing of corn into tortilla. *International Journal of Food Science*. John Wiley and Sons Ltd.
- Flores-Farías, R. *et al.* 2000. Physicochemical and rheological characteristics of commercial nixtamalized Mexican maize flours for tortillas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 80: 657–664.
- Fournaise, T. *et al.* 2020. Impact of formulation on reconstitution and flowability of spray-dried milk powders. *Powder Technology*. 372: 107–116.
- Francisco-Ponce, B.A. *et al.* 2024. Effect of ultrasound processing on the physical and powder-flow properties of nixtamalized corn flour and its influence on the quality parameters of tortilla. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 18: 6050–6061.
- Huerta-Vera, K. *et al.* 2025. Optimal storage conditions for spray-dried chayote juice (*Sechium edule* (Jacq.) Sw. cv. *Perla Negra*) microencapsulated with gum arabic. *Food and Bioproducts Processing*. 150: 296–309.
- Ishwarya, S.P. y Anandharamakrishnan, C. 2015. Spray-Freezing approach for soluble coffee processing and its effect on quality characteristics. *Journal of Food Engineering*. 149: 171–180.
- Ishwarya, S.P., Anandharamakrishnan, C. y Stapley, A.G.F. 2015. Spray-freeze-drying: A novel process for the drying of foods and bioproducts. *Trends in Food Science and Technology*. 41(2): 161–181.
- Janve, B. *et al.* 2013. Enhancement of corn nixtamalization by power ultrasound. *Food and Bioprocess Technology*. 6(5): 1269–1280.
- Kamphorst, R. *et al.* 2023. On the fluidization of cohesive powders: Differences and similarities between micro- and nano-sized particle gas–solid fluidization. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 101(1): 227–243.
- Landillon, V. *et al.* 2008. Flowability, cohesive, and granulation properties of wheat powders. *Journal of Food Engineering*. 86(2): 178–193.
- León-Villalobos, J.A. *et al.* 2023. Effect of calcium hydroxide on pasting, thermal, and water-adsorption behavior, and the flow properties of nixtamalized corn flour. *Journal of Food Process Engineering*. 46(8): e14366.
- Ma, H. *et al.* 2022. Research progress on properties of pre-gelatinized starch and its application in wheat flour products. *Grain and Oil Science and Technology*. KeAi Communications Co. 5(2): 87–97.
- Martínez-Bustos, F. *et al.* 2000. Characteristics of nixtamalized maize flours produced with the use of microwave heating during alkaline cooking. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 80(6): 651–656.
- Méndez-Albores, A. *et al.* 2014. Technological and nutritional properties of maize tortillas. *Journal of Food and Nutrition Research*. 53(1): 60–70.
- Miñón-Hernández, D. *et al.* 2018. Biofunctionality of native and nano-structured blue corn starch in prediabetic Wistar rats. *CYTA - Journal of Food*. 16(1): 477–483.
- Morales, N.X.C. *et al.* 2021. Stabilisation of betalains and phenolic compounds extracted from red cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) by spray and freeze-drying using oca (*Oxalis tuberosa*) starch as drying aid. *Food Science and Technology International*. 27(5): 456–469.
- Pascual-Pineda, L.A. *et al.* 2019. Effect of porous structure and spreading pressure on the storage stability of red onion microcapsules produced by spray freezing into liquid cryogenic and spray drying. *Journal of Food Engineering*. 245: 65–72.
- Pascual-Pineda, L.A. *et al.* 2022. Determination of the spreading pressure and shelf-life of spray-dried coffee powder: Quality assurance of a water-soluble food. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 21(3).
- Rojas-Molina, I. *et al.* 2007. Study of structural and thermal changes in endosperm of quality protein maize during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry*. 84(4): 304–312.
- Romero-Luna, H.E. *et al.* 2018. Characterisation of nanostructured potato starch powders with blackberry (*Rubus fruticosus* Var. *Brazos*) juice. *American Journal of Potato Research*. 95(2): 144–156.
- Sahai, D. *et al.* 2001. Alkaline Processing (Nixtamalization) of White Mexican Corn Hybrids for Tortilla Production: Significance of Corn Physicochemical Characteristics and Process Conditions 1. *Cereal chemistry*. 78 (2):116-120.
- Salinas-Moreno, Y. *et al.* 2018. Mezclas de maíz normal con maíz ceroso y su efecto en la calidad de la tortilla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2(5): 689–702.
- Santiago-Ramos, D. *et al.* 2015. Effects of annealing and concentration of calcium salts on thermal and rheological properties of maize starch during an ecological nixtamalization process. *Cereal Chemistry*. 92(5): 475–480.
- Santiago-Ramos, D. *et al.* 2018. Physicochemical properties of nixtamalized black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *Food Chemistry*. 240(2017): 456–462.
- Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. de D. y Véles-Medina, J.J. 2018. Viscoelastic behaviour of masa from corn flours obtained by nixtamalization with different calcium sources. *Food Chemistry*. 248: 21–28.
- Suastegui-Baylón, L. *et al.* 2021. Physical, chemical and rheological characterization of tuber and starch from *Ceiba aesculifolia* subsp. *Parvifolia*. *Molecules*. 26(7): 1–18.
- Villada, J.A. *et al.* 2017. Study of the morphological, structural, thermal, and pasting corn transformation during the traditional nixtamalization process: From corn to tortilla. *Journal of Food Engineering*. 212: 242–251.
- Wu, G. *et al.* 2021. Functionalization of sodium caseinate fortified with blackcurrant concentrate via spray-drying and freeze-drying techniques: The nutritional properties of the fortified particles. *Lwt*. 142(2): 111051.
- Zhang, J. *et al.* 2022. Physical modification of waxy maize starch: Combining SDS and freezing/thawing treatments to modify starch structure and functionality. *Food Structure*. 32(2): 100263.