

Valorización de Subproductos de Ajonjolí: Propiedades Químicas y Funcionales posteriores al Proceso de Extrusión

Valorization of Sesame By-Products: Chemical and Functional Properties after Extrusion Processing

Ruiz-Armenta, X.A.¹, Quintero-Soto, M.F.^{2,3}, Uribe-Najar, A.L.²,
Espinoza-Moreno, R.M.², Cárdenas-Torres, F.I.⁴, Carrillo-Torres, J.A.⁵,
Gómez-Favela, M.A.^{1,3,4*}

¹ Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calz. de las Américas Nte 2771, Cd Universitaria, Col. Burócrata, C.P. 80030 Culiacán, Sinaloa, México.

² Ingeniería Agroindustrial, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra (UPMYS), Carretera a Potrerillos del Norote Km 3, La Cruz, Elota, Sinaloa, México. CP 80027

³ Programa de Estancias Posdoctorales por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT).

⁴ Posgrado de Ciencias de la Nutrición y Alimentos Medicinales, Facultad de Ciencias de la Nutrición y Gastronomía Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. Cedros S/N y Calle Sauces, Los Sauces, Fracc. Los Fresnos, 80019. Culiacán, Sinaloa, México.

⁵ Doctorado en Sustentabilidad, Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Regional Guasave, Av. Universidad S/N, Fraccionamiento Villa Universidad, C.P. 81048, Guasave, Sinaloa, México.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Ruiz-Armenta, X.A., Quintero-Soto, M.F., Uribe-Najar, A.L., Espinoza-Moreno, R.M., Cárdenas-Torres, F.I., Carrillo-Torres, J.A., Gómez-Favela, M.A. (2026). Valorization of Sesame By-Products: Chemical and Functional Properties after Extrusion Processing. *Revista Bio Ciencias*, 13, e2016. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2016>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: July 04, 2025.

Accepted/Aceptado: December 11, 2025.

Available on line/Publicado: January 09, 2026.

RESUMEN

El ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) es una semilla rica en lípidos, proteínas y carbohidratos, utilizada principalmente para la extracción de aceite. El subproducto residual de este proceso, sin embargo, podría tener valor como ingrediente funcional debido a su alto contenido de compuestos bioactivos. En este estudio, se evaluaron las características químicas, fisicoquímicas y tecno-funcionales de la harina de subproducto de ajonjolí obtenida mediante extrusión a 139 °C y 80 rpm en un extrusor de tornillo simple. El proceso de extrusión mejoró significativamente la harina, aumentando la fibra dietética insoluble en un 122.22 % y la fibra total en un 1.68 %. Además, se incrementaron la densidad aparente, la actividad de agua, el índice de solubilidad en agua, la dispersabilidad y la estabilidad de emulsión. Estos cambios hacen que la harina extrudida sea adecuada para el desarrollo de alimentos funcionales, como bebidas, gracias a sus mejoradas propiedades químicas y tecno-funcionales. El proceso de extrusión, por lo tanto, demuestra ser una tecnología eficaz para mejorar las características de las harinas y ampliar su potencial en aplicaciones nutraceuticas.

PALABRAS CLAVE: Subproducto de ajonjolí, extrusión, tecno-funcional, composición proximal, WAI, WSI.

*Corresponding Author:

Mario Armando Gómez Favela. Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calz. de las Américas Nte 2771, Cd Universitaria, Col. Burócrata, C.P. 80030 Culiacán, Sinaloa, México. Teléfono: (667) 2169112. mario.gomez.fcqb@uas.edu.mx

ABSTRACT

Sesame (*Sesamum indicum* L.) is a seed rich in lipids, proteins, and carbohydrates, primarily used for oil extraction. The residual by-product of this process, however, could be valuable as a functional ingredient due to its high content of bioactive compounds. In this study, the chemical, physicochemical, and techno-functional characteristics of sesame by-product flour obtained by extrusion at 139 °C and 80 rpm in a single-screw extruder were evaluated. The extrusion process significantly improved the flour, increasing insoluble dietary fiber by 122.22 % and total fiber by 1.68 %. In addition, the bulk density, water activity, water solubility index, dispersibility, and emulsion stability were increased. These changes make the extruded flour suitable for the development of functional foods, such as beverages, thanks to its improved chemical and techno-functional properties. The extrusion process, therefore, proves to be an effective technology for improving flour characteristics and expanding their potential for nutraceutical applications.

KEY WORDS : Sesame by-product, extrusion, techno-functional, proximal composition, WAI, WSI.

Introducción

El ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) es una semilla rica en lípidos (aproximadamente 50 %), proteína (17–35 %) y carbohidratos (14–24 %). Además, es rico en ácidos grasos (oleico, linoleico, palmítico y esteárico), minerales (calcio, hierro, fósforo, potasio) y vitaminas (B1, E) (Sharma *et al.*, 2021; Quintero-Soto *et al.*, 2022). También presenta una fracción insaponificable considerable con la presencia de compuestos como esteroides, tocoferoles y lignanos (sesamina y sesamolina) (Ruiz-Armenta *et al.*, 2022). Se ha reportado la presencia de algunos compuestos antinutricionales en las semillas de ajonjolí, tales como lectinas, saponinas, inhibidores de tripsina, taninos y oxalatos, los cuales interfieren con el metabolismo humano al dificultar la absorción de algunos minerales en el organismo. Por lo tanto, es necesaria la aplicación de tecnologías térmicas para la reducción o eliminación de estos componentes (Quintero-Soto *et al.*, 2022; Ruiz-Armenta *et al.*, 2022).

La semilla de ajonjolí se utiliza principalmente para la extracción de aceite debido a su buen perfil de ácidos grasos, con predominio de los ácidos grasos insaturados. Sin embargo, el subproducto residual generado podría emplearse como ingrediente en la formulación de nuevos productos alimenticios, ya que contiene altos niveles de proteínas, minerales, fibra dietaria y compuestos fenólicos, aportando alta calidad nutricional y nutracéutica al producto resultante (Ruiz-Armenta *et al.*, 2022). Se estima que anualmente se obtienen aproximadamente 1.53 millones de toneladas de subproducto de ajonjolí a nivel mundial, los cuales no son valorizados

y podrían ser candidatos para la producción de alimentos funcionales debido a su contenido de compuestos bioactivos (Nagar *et al.*, 2022; Quintero-Soto *et al.*, 2022).

La extrusión es un proceso que pertenece a las tecnologías verdes, ya que no genera efluentes contaminantes y ofrece ventajas como alta productividad, bajos costos operativos, alta calidad de los productos obtenidos, retención de compuestos bioactivos y alta eficiencia energética (Quintero-Soto *et al.*, 2022). La extrusión es un proceso de cocción rápida que mejora la calidad nutricional y nutracéutica de los alimentos, incrementa la digestibilidad de proteínas y almidón, modifica el contenido lipídico, inactiva microorganismos y enzimas, reduce compuestos antinutricionales, aumenta el contenido de fibra dietaria y mejora la retención de compuestos fitoquímicos (Ruiz-Armenta *et al.*, 2022). Es una alternativa tecnológica para el desarrollo de alimentos como cereales para desayuno listos para consumir, nuevos ingredientes, botanas a base de cereales, alimentos funcionales, entre otros (Patil & Kaur, 2018; Grasso, 2020). Además, tiene el potencial de producir harinas con buenas propiedades tecno-funcionales y mínima degradación de compuestos bioactivos, las cuales pueden ser utilizadas como ingredientes en el desarrollo de alimentos funcionales (Gómez-Favela *et al.*, 2021). Ruiz-Armenta *et al.* (2022) reportaron una optimización de variables del proceso (temperatura de extrusión (ET)/velocidad del tornillo (SS)) para obtener una harina de ajonjolí extrudida con altos valores de índice de absorción de agua (WAI), índice de solubilidad en agua (WSI), digestibilidad proteica *in vitro* (IVPD), compuestos fenólicos totales (TPC) y actividad antioxidante (AoxA). Encontraron la mejor combinación de variables en ET = 139 °C / SS = 80 rpm. Quintero-Soto *et al.* (2022) elaboraron una bebida funcional utilizando harina de subproducto de ajonjolí obtenida bajo la combinación de variables optimizada reportada por Ruiz-Armenta *et al.* (2022). Informaron que la bebida con harina de subproducto de ajonjolí extrudido mostró mayor contenido de compuestos fenólicos totales, actividad antioxidante e inhibición enzimática (α -amilasa, α -glucosidasa) que la bebida con harina de subproducto de ajonjolí sin extrudir.

Solo los trabajos mencionados anteriormente han sido reportados respecto a la aplicación del proceso de extrusión en subproductos de ajonjolí. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar las propiedades químicas, fisicoquímicas y tecno-funcionales de harina de subproducto de ajonjolí extrudida.

Material y métodos

La materia prima utilizada fue semilla de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) de color beige, adquirida en la comunidad de El Saladito, Elota, Sinaloa, México. Las semillas fueron limpiadas para eliminar residuos e impurezas, envasadas en bolsas de polietileno herméticamente selladas y almacenadas en refrigeración a 4 °C hasta su uso posterior.

Obtención de harina de subproducto de ajonjolí extrudido

Primero, las semillas de ajonjolí fueron prensadas mecánicamente dos veces para remover la mayor cantidad de aceite posible, debido a que el extrusor utilizado está diseñado

para materiales con bajo contenido de humedad y de aceite. La harina de subproducto de ajonjolí obtenida (500 g) se acondicionó con agua destilada hasta alcanzar un 23 % de humedad. Esta condición fue determinada a partir de experimentos preliminares en los que mayores niveles de humedad dificultaron la manipulación de las harinas. La harina acondicionada se colocó en una bolsa de plástico y se dejó reposar en refrigeración a 4 °C por 12 horas para homogenizar la humedad en toda la muestra. Posteriormente, se permitió que la muestra alcanzara la temperatura ambiente (25 °C) para evitar su adherencia al equipo. La extrusión se realizó mediante un extrusor de un solo tornillo modelo 20DN (CW Brabender Instruments, Inc., NJ, USA), con un diámetro de tornillo de 19 mm, relación longitud-diámetro 20:1, relación de compresión 1:1 y una matriz de salida de 4 mm. Las condiciones de temperatura de extrusión (ET) y velocidad de tornillo (SS) utilizadas fueron ET = 139 °C y SS = 80 rpm, previamente optimizadas según lo reportado por Ruiz-Armenta *et al.* (2022). El producto extrudido fue recolectado en charolas y secado a temperatura ambiente con ayuda de un ventilador hasta alcanzar una actividad de agua de 0.5 para prevenir el crecimiento microbiano. Finalmente, los pellets fueron molidos para obtener la harina de subproducto de ajonjolí extrudido, la cual se utilizó para la evaluación de las propiedades correspondientes.

Composición química

La composición química de la harina de subproducto de ajonjolí se determinó siguiendo las metodologías reportadas por la AOAC (2023) para proteína total (960.52), lípidos (923.03) y cenizas (934.01). El contenido de fibra dietética soluble, insoluble y total se determinó mediante el método gravimétrico-enzimático (985.29) para fibra dietética total. El contenido de carbohidratos se calculó por diferencia restando los componentes anteriores de un valor de 100. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

Propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales

pH

El pH se determinó de acuerdo con la metodología AOAC (2023). Se adicionaron 10 g de muestra a 100 mL de agua desionizada hervida y enfriada, y se homogenizó con una varilla de vidrio. La suspensión fue agitada en un orbitador (240 rpm/10 min) y posteriormente se midió el pH. El análisis se realizó por triplicado.

Densidad aparente

Se determinó según la Norma Oficial Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002 (NOM, 2007). Se colocaron 100 mL de harina en una probeta utilizando un embudo y se golpeó suavemente cinco veces para favorecer el asentamiento de las partículas. Se completó el volumen total, se registró el peso de la harina y con estos datos se calculó la densidad aparente. La determinación se realizó por triplicado.

Actividad de agua (a_w)

Se determinó utilizando un equipo Aqualab modelo CX2 (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA), siguiendo el procedimiento descrito por Takeungwongtrakul *et al.* (2020). Aproximadamente 2 g de muestra se colocaron en el portamuestras del equipo hasta alcanzar el equilibrio (5–10 min). El equipo fue calibrado con agua destilada ($a_w = 0.99–1.0$). Las mediciones se realizaron por triplicado a 25 ± 1 °C.

Diferencia de color total (ΔE)

Se utilizó la metodología reportada por Álvarez-Ossorio *et al.* (2022). El color de las muestras se determinó con un colorímetro Minolta Chroma-Meter modelo CR-210 (Minolta LTD, Japón). Para la evaluación del color, aproximadamente 100 g de muestra se colocaron en la tapa de una caja Petri de vidrio Kimax de 15 cm de diámetro y se midieron los parámetros de luminosidad (L^*), rojez (a^*) y amarillez (b^*). Se utilizó un mosaico blanco como referencia con valores conocidos de L^* , a^* y b^* ($L^* = 97.63$, $a^* = -0.78$ y $b^* = 2.85$). La diferencia de color total (ΔE) de la muestra se calculó utilizando la ecuación correspondiente:

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$$

Donde: ΔE = Diferencia total de color entre el estándar y la muestra; ΔL , Δa y Δb = Diferencias absolutas de los valores L^* , a^* y b^* del estándar utilizado y los valores correspondientes observados en la muestra.

Índice de absorción de agua (WAI) e índice de solubilidad en agua (WSI)

Para estas evaluaciones se empleó el método descrito por Ruiz-Armenta *et al.* (2022). Una muestra de 2.5 g de harina se suspendió en 30 mL de agua a 30 °C en un tubo de centrifugación de 50 mL previamente tarado. La suspensión se agitó en un agitador orbital a velocidad moderada (250 rpm/30 min) y posteriormente se centrifugó ($3000 \times g$ / 30 °C / 10 min). El precipitado y el sobrenadante se utilizaron para calcular el WAI y el WSI, respectivamente. El gel formado se pesó para calcular el WAI, expresado como gramos de gel por gramo de muestra. El sobrenadante se decantó cuidadosamente en un recipiente tarado para la determinación de sólidos. El WSI, expresado como gramos de sólidos por gramo de sólidos originales, se calculó a partir del peso de los sólidos secos recuperados por evaporación del sobrenadante (110 °C / 12 h). Ambos índices se determinaron por triplicado.

Índice de absorción de aceite (OAI)

La absorción de aceite de las harinas se determinó utilizando la metodología reportada por Chandra *et al.* (2015) con algunas modificaciones. Muestras de 0.5 g de harina con 3 mL de aceite vegetal se colocaron en un tubo de centrifugación graduado, se agitaron en un vortex durante 1 min, se dejaron reposar 30 min y finalmente se centrifugaron a $1600 \times g$ / 25 °C /

25 min, midiéndose posteriormente el volumen de aceite libre. La cantidad de aceite absorbido se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$OAI = \frac{(V_1 - V_2)}{g \text{ de muestra}}$$

Donde: V_1 es el volumen inicial de aceite y V_2 es el volumen final de aceite, expresado como mL de aceite absorbido por gramo de harina. La prueba se realizó por triplicado.

Dispersabilidad

Se determinó de acuerdo con Mora-Escobedo *et al.* (1991). Un gramo de muestra se suspendió en 10 mL de agua desionizada en un tubo cónico graduado; las muestras se homogenizaron utilizando un homogeneizador Ultra Turrax a 10,000 rpm durante 5 min. La separación de fases se midió después de 30 minutos de reposo.

Capacidad de formación y estabilidad de espuma

Se evaluaron de acuerdo con los procedimientos propuestos por Huffman *et al.* (1975). Se colocaron 0.5 g de muestra en una probeta graduada de 100 mL, a la cual se agregaron 50 mL de agua destilada. La mezcla se agitó con un Ultra Turrax a 12,000 rpm durante 1 min, y se midió el volumen de espuma formado. La capacidad de formación de espuma se reportó como porcentaje (% FFC) y se calculó según la ecuación:

$$\% FFC = \left[\frac{(\text{Volumen despues de agitar} - \text{Volumen antes de agitar})}{\text{Volumen antes de agitar}} \right] (100)$$

La probeta graduada que contenía la suspensión agitada, para la cual se evaluó el % FFC, se dejó reposar durante 30 minutos; al finalizar este tiempo, se midió el volumen de la espuma residual y la estabilidad de la espuma, reportada como porcentaje (% FS), se calculó de acuerdo con la ecuación:

$$\% FS = \left[\frac{\text{Volumen de espuma despues del reposo}}{\text{Volumen total de espuma}} \right] (100)$$

Actividad y estabilidad de emulsión

Para la determinación de la actividad emulsificante y estabilidad de la emulsión, se utilizó la metodología reportada por Huffman *et al.* (1975). Se pesaron 0.7 g de muestra y se adicionaron a 10 mL de agua destilada y 10 mL de aceite vegetal. La suspensión fue homogeneizada a 12,000 rpm durante 1 minuto. La suspensión homogeneizada se centrifugó a $1300 \times g/25^\circ\text{C}$ durante 5 minutos y se midió el volumen de la emulsión formada. La actividad emulsificante se evaluó relacionando la capa emulsionada formada con el volumen total y se reportó como el porcentaje de actividad emulsificante (% EA). La estabilidad de la emulsión se evaluó utilizando los mismos

tubos empleados en la determinación del % EA. Los tubos fueron sometidos a un tratamiento térmico en baño María (80°C/30 min), enfriados y centrifugados a 1300 × g/25°C durante 5 minutos, y se midió nuevamente el volumen de la emulsión. La estabilidad de la emulsión se reportó como porcentaje (% ES) y se expresó como el porcentaje de emulsión retenida después del tratamiento térmico. La prueba se realizó por triplicado.

Análisis estadístico

El análisis de datos se realizó utilizando un diseño de una vía, con el tipo de proceso como el factor de estudio con dos niveles (procesado por extrusión y sin procesar), empleando el software STATGRAPHICS Plus versión 5.1 (Statistical Graphics Corporation™, Rockville, Maryland, EUA). Se utilizó la prueba de Fisher con un nivel de significancia del 5 % para comparar las medias de la composición química, propiedades fisicoquímicas y propiedades tecno-funcionales de las harinas extrudidas y no extrudidas.

Resultados y Discusión

Caracterización química de subproducto de ajonjolí extrudido

La Tabla 1 muestra la composición proximal de la harina de subproducto de ajonjolí y el efecto del proceso de extrusión sobre estos componentes. Se puede apreciar que los subproductos de ajonjolí presentaron un alto contenido de proteína (28.72 ± 1.86 %) y fibra dietética total (26.84 ± 0.26 %), así como un bajo contenido de lípidos (15.13 ± 0.47 %) en comparación con el grano entero (~50 %, datos no mostrados). Diversos autores han reportado la composición proximal de subproductos de ajonjolí obtenidos mediante diferentes métodos. Bukya & Vijayakumar (2013) evaluaron una pasta de ajonjolí obtenida después del proceso de extracción de aceite mediante un método tradicional de molino aceitero, reportando valores altos de proteína (48.28 %) y carbohidratos (40.94 %), y bajos contenidos de lípidos (0.82 %) y cenizas (9.96 %). Costa do Nascimento *et al.* (2012) caracterizaron una pasta de ajonjolí desgrasada utilizando un extrusor tipo expeller a temperatura ambiente (25 °C), obteniendo bajos contenidos de proteína (12.19 %) y valores altos de lípidos (38.08 %). Asimismo, estos autores reportaron contenidos de cenizas y carbohidratos de 9.36 % y 40.37 %, respectivamente.

Tabla 1. Efecto del proceso de extrusión sobre la composición química de harina de subproducto de ajonjolí

Composición (%)	USAF ¹	ESAF ²
Proteína total	28.72 ± 1.86 ^a	29.74 ± 2.05 ^a
Lípidos	15.13 ± 0.47 ^a	15.15 ± 0.83 ^a
Cenizas	10.14 ± 0.09 ^a	10.27 ± 0.05 ^a
Fibra dietaria soluble	0.63 ± 0.03 ^b	1.40 ± 0.01 ^a
Fibra dietaria insoluble	26.21 ± 0.23 ^a	25.89 ± 0.31 ^b
Fibra dietaria total	26.84 ± 0.26 ^b	27.29 ± 0.32 ^a
Carbohidratos	19.17 ± 1.67 ^a	17.55 ± 1.41 ^a

¹USAF = Harina de subproducto de ajonjolí crudo; ²ESAF = Harina de subproducto de ajonjolí extrudido. ^{a-b} Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de acuerdo con la prueba de Fisher.

Fuente: Elaboración propia

Banerjee *et al.* (2022) evaluaron la composición proximal de harina de ajonjolí desgrasada mediante extracción por Soxhlet con hexano, encontrando valores más altos de proteína (52.62 %) y carbohidratos totales (35.32 %), así como menores contenidos de lípidos (3.84 %) y cenizas (8.22 %) en comparación con los resultados obtenidos en este trabajo. Melo *et al.* (2021) extrajeron aceite de ajonjolí mediante prensado en frío y obtuvieron valores similares en el contenido de proteína (30.74 %), cenizas (7.37 %) y fibra dietética soluble, insoluble y total (3.43 %, 22.53 % y 25.96 %, respectivamente), a los reportados en este estudio. Sin embargo, estos autores informaron un contenido lipídico de 33.02 %, mientras que en este estudio se encontraron valores cercanos al 15 %. Por otro lado, Elsorady (2020) caracterizó la pasta de ajonjolí obtenida como subproducto de la industria aceitera, encontrando un contenido lipídico de 11.59 %, proteínas de 45.63 %, 6.79 % de cenizas y 35.98 % de carbohidratos. La diferencia entre los valores de contenido lipídico reportados por diferentes autores se debe principalmente al tipo de desgrasado realizado en la semilla.

Las proteínas tienen un efecto importante en las propiedades físicas y nutricionales de los productos extrudidos. Como se observa en la Tabla 1, la extrusión no tuvo un efecto significativo en el contenido proteico; sin embargo, el principal efecto del proceso de extrusión sobre las proteínas se relaciona con cambios en la calidad proteica, que involucran alteraciones en el perfil de aminoácidos, la digestibilidad y la funcionalidad, la cual incluye texturización y solubilidad. La calidad proteica está influenciada por múltiples factores como el origen, la matriz alimentaria, la biodisponibilidad y las condiciones de procesamiento. Se ha reportado que la extrusión altera mínimamente el contenido proteico total pero afecta significativamente la disponibilidad de aminoácidos esenciales y la digestibilidad de la proteína (Gulati *et al.*, 2020). Uno de los principales cambios ocurre en el contenido de lisina disponible, que participa en la reacción de

Maillard al entrar en contacto con azúcares reductores presentes en el material, lo que resulta en su disminución en el producto procesado y puede evaluarse de manera indirecta mediante el oscurecimiento de la muestra procesada, lo cual indica pérdida de lisina. Por otra parte, los parámetros de procesamiento influyen en la pérdida o retención de lisina; por ejemplo, la temperatura de extrusión se correlaciona negativamente con la pérdida de lisina, mientras que la humedad del material se correlaciona positivamente. Asimismo, altas velocidades del tornillo y reducción del diámetro de la matriz pueden ayudar a retener lisina durante el proceso de extrusión. Otros aminoácidos afectados por la extrusión incluyen treonina, valina, leucina e isoleucina, los cuales pueden degradarse debido a los efectos de la temperatura en el barril (Dalbhagat *et al.*, 2019; Gulati *et al.*, 2020). La temperatura y la fuerza de corte a la que se someten los alimentos durante la extrusión mejoran la disponibilidad proteica mediante diferentes mecanismos, como la desactivación de compuestos antinutricionales (inhibidores de tripsina, lectinas, taninos y fitatos), favorecida por las temperaturas y tiempos de residencia dentro del extrusor, lo que contribuye a mejorar la digestibilidad proteica. Además, la fuerza de corte ayuda a abrir estructuras proteicas durante la extrusión, facilitando el acceso de enzimas digestivas (Arribas *et al.*, 2017; Dalbhagat *et al.*, 2019).

Se observaron también cambios significativos en el contenido de fibra dietaria debido al proceso de extrusión. La harina de subproducto de ajonjolí extrudida mostró un aumento significativo ($p < 0.05$) del 122.22 % y 1.68 % en fibra dietaria soluble y fibra dietaria total, respectivamente. Mientras tanto, la fibra dietaria insoluble mostró una disminución significativa ($p < 0.05$) del 1.22 % (Tabla 1). La fibra dietaria desempeña un papel esencial en la alimentación humana, contribuyendo a la prevención del estreñimiento, cáncer de colon, diabetes, entre otras enfermedades; además, su incorporación en diferentes formulaciones alimentarias favorece el control de peso (Arribas *et al.*, 2017). La fibra dietaria está compuesta por polímeros de carbohidratos comestibles con diez o más unidades monoméricas que no son hidrolizadas por enzimas endógenas del intestino delgado. Durante la extrusión, la fibra dietaria puede modificarse significativamente al alterar su contenido total y su solubilidad (Alam *et al.*, 2016; Gulati *et al.*, 2020). Este proceso contribuye a cambios en las propiedades fisicoquímicas de la fibra insoluble, aumentando la fracción soluble como resultado de fuerzas de corte. La combinación de altas temperaturas y fuerzas de corte en la extrusión promueve la redistribución de fibra insoluble en fibra soluble. Además, ocurre la ruptura de complejos minerales, liberándolos y aumentando la biodisponibilidad de Fe, Cu, Zn y Mn (Alam *et al.*, 2016; Kamau *et al.*, 2020). Una combinación de baja humedad y altas temperaturas favorece la conversión de fibra insoluble a soluble, mientras que el uso de bajas velocidades del tornillo facilita la transformación de fibra al generar mayor compresión y fricción sobre el material (Kamau *et al.*, 2020). Sin embargo, tiempos largos de residencia promueven la formación de almidón resistente debido a la presencia de complejos almidón-lípido en la matriz alimentaria, lo cual incrementa la fibra soluble. Este aumento de almidón resistente durante extrusión puede presentarse mediante dos mecanismos: 1) formación de nuevos enlaces no hidrolizables por enzimas digestivas como resultado de transglucosidación al romper enlaces carbono-oxígeno tipo 1,4; y 2) formación de amilosa retrogradada, la cual presenta mayor resistencia que la amilosa no retrogradada a las enzimas hidrolíticas del almidón (Kamau *et al.*, 2020).

Por otro lado, los contenidos de lípidos, cenizas y carbohidratos totales no mostraron cambios significativos ($p < 0.05$) después del proceso de extrusión (Tabla 1). La extrusión produce pérdida de la estructura cristalina del almidón acompañada de una liberación completa o parcial de amilosa, lo que altera su viscosidad. Estos cambios dependen de la combinación de variables del proceso como humedad, temperatura de extrusión, tiempo de residencia dentro del barril y fuerzas de corte. Además, la extrusión incrementa la digestibilidad del almidón al abrir los gránulos y mejorar su gelatinización, haciéndolos más susceptibles a la acción de enzimas hidrolíticas. Las fuerzas de corte durante la extrusión hidrolizan parcialmente la amilosa y la amilopectina, generando maltodextrinas. El aumento en digestibilidad del almidón se atribuye a la gelatinización parcial, fragmentación polimérica y despolimerización, permitiendo mayor acceso enzimático. Sin embargo, también se forman complejos almidón-lípido, con mayor resistencia a la digestión enzimática (Wang *et al.*, 2017; 2018; Kamau *et al.*, 2020).

Las transformaciones del almidón durante la extrusión incluyen pérdida de estructura cristalina, destrucción de la estructura granular, ruptura de enlaces glucosídicos y formación de nuevas interacciones moleculares. Estos cambios dependen de la humedad, presión, temperatura y fuerza de corte del proceso. A bajas temperaturas y alta humedad, el gránulo de almidón permanece prácticamente sin cambios, resultando en productos con bajo índice de expansión; mientras que al incrementar la temperatura ($>150^{\circ}\text{C}$), los gránulos pierden su estructura original (Alam *et al.*, 2016). La estructura del almidón en leguminosas influye directamente en su digestión. Altas temperaturas de extrusión modifican las características de digestibilidad del almidón, observándose valores menores a 100°C comparados con 125°C y 150°C (Rathod & Annapure, 2017).

En cuanto al contenido lipídico, este influye en la lubricación del material dentro del barril, modificando la energía mecánica específica (SME) y las propiedades del producto extrudido. Cuando los niveles de lípidos son bajos ($< 5\%$), la cristalinidad del producto disminuye y la SME se estabiliza; mientras que altos niveles lipídicos reducen la SME y la expansión del extrudido (Dalbhagat *et al.*, 2019). Adicionalmente, los lípidos pueden formar complejos físicos con el almidón, dificultando su extracción con solventes no polares, lo que provoca una disminución del contenido lipídico aparente en las muestras extrudidas durante el análisis proximal. La formación de complejos almidón-lípido se favorece a altas temperaturas y altos contenidos de humedad; sin embargo, productos obtenidos bajo estas condiciones presentan características indeseables como alta densidad, dureza y pérdida de aceite en el extrusor (Alam *et al.*, 2016; Arribas *et al.*, 2017; Gulati *et al.*, 2020). La formación de complejos almidón-lípido es indeseable desde el punto de vista físico, pero nutricionalmente favorable porque mejora la estabilidad oxidativa de los lípidos, reteniendo una mayor proporción de ácidos grasos esenciales durante la extrusión. Además, parte de este almidón se convierte en fibra dietaria al hacerse resistente a la digestión (Gulati *et al.*, 2020). Extrudir alimentos con alto contenido lipídico ($>5\text{--}6\%$) complica el rendimiento del extrusor debido a una reducción en el deslizamiento en el cilindro, disminuyendo el torque (Dalbhagat *et al.*, 2019).

Por otro lado, la biodisponibilidad de minerales en alimentos de origen vegetal está influenciada por dos factores principales: 1) la forma química en la que se encuentra el elemento

(mineral, ión libre, estado de oxidación), y 2) la asociación del elemento con otros componentes de la harina como ácido fítico, fibra dietaria y proteínas. Se ha encontrado que los minerales son térmicamente estables durante el procesamiento de diversas matrices alimentarias (Dalbhagat *et al.*, 2019). La extrusión puede afectar positiva o negativamente la biodisponibilidad mineral mediante la eliminación de factores antinutricionales como fitatos y taninos, que forman complejos con minerales e inhiben su absorción (Dalbhagat *et al.*, 2019; Gulati *et al.*, 2020). El impacto de la extrusión sobre el ácido fítico, compuestos fenólicos, fibra dietaria y proteínas es la principal causa del cambio en biodisponibilidad mineral. El ácido fítico forma complejos insolubles al unirse con Fe y Zn, evitando su absorción en el tracto digestivo. La extrusión provoca desfosforilación del ácido fítico, liberando los metales quelados. De manera similar, los compuestos fenólicos se unen a minerales esenciales mediante sus grupos aniónicos, reduciendo su biodisponibilidad; durante la extrusión, los fenoles se degradan o polimerizan, disminuyendo sus propiedades quelantes (Gulati *et al.*, 2020). La extrusión puede mejorar la absorción mineral al inactivar inhibidores de absorción a altas temperaturas, hidrolizar fitatos y aumentar la disponibilidad de minerales; sin embargo, a bajas temperaturas reduce el contenido de fitatos en trigo sin afectar leguminosas (Kamau *et al.*, 2020). Asimismo, componentes de la fibra dietaria (lignina y polisacáridos de pared celular) pueden formar complejos con Mg y Ca. El proceso de extrusión modifica los polisacáridos de pared celular, favoreciendo la absorción mineral; aunque la liberación de polisacáridos aniónicos insolubles podría reducir la bioaccesibilidad mineral, ya que dichos complejos podrían degradarse en el intestino grueso por la microbiota. Condiciones de proceso como baja humedad y altas temperaturas favorecen la degradación de fitatos, fenoles, fibra dietética y proteínas, mejorando la absorción mineral y creando modificaciones no térmicas basadas en fuerzas de corte. Alta fuerza de corte durante extrusión puede reducir el hierro férrico a su forma ferrosa, más soluble y de mayor absorción (Gulati *et al.*, 2020).

Caracterización fisicoquímica de subproducto de ajonjolí extrudido

La Tabla 2 muestra el efecto del proceso de extrusión sobre el pH, la densidad aparente, la actividad de agua (a_w) y los parámetros de color de la harina de subproducto de ajonjolí. Se puede observar que el proceso de extrusión provocó una disminución ligera pero significativa ($p < 0.05$) en el valor de pH y en la luminosidad (L^*) de la harina, mientras que se presentó un incremento significativo ($p < 0.05$) en la densidad aparente, la actividad de agua (a_w), los parámetros de color a^* y b^* , y en la diferencia total de color (ΔE). La disminución del pH en la harina de subproducto de ajonjolí después de ser procesada por extrusión podría atribuirse a otros cambios químicos, tales como modificación de lípidos, desnaturalización de proteínas, reacción de Maillard, entre otros (Escobedo-Avellaneda *et al.*, 2025). Las propiedades físicas de los alimentos reflejan la interacción entre componentes, estructura, propiedades fisicoquímicas y la naturaleza del entorno dentro de la matriz alimentaria (Bukya & Vijayakumar, 2013).

Tabla 2. Efecto del proceso de extrusión sobre las propiedades fisicoquímicas de harina de subproducto de ajonjolí

Parámetro	USAF ¹	ESAF ²
pH	6.51 ± 0.01 ^a	6.4 ± 0.05 ^b
Densidad aparente (g/mL)	0.53 ± 0.03 ^b	0.63 ± 0.01 ^a
Actividad de agua (a _w)	0.496±0.008 ^b	0.552±0.01 ^a
Color		
L*	59.38±0.74 ^a	54.58±0.67 ^b
a*	2.88±0.05 ^b	3.38±0.12 ^a
b*	16.22±0.15 ^b	17.94±0.13 ^a
Diferencia total de color (ΔE)	37.08±0.67 ^b	43.11±0.95 ^a

¹USAF = Harina de subproducto de ajonjolí crudo; ²ESAF = Harina de subproducto de ajonjolí extrudido. ^{a-b} Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de acuerdo con la prueba de Fisher.

Fuente: Elaboración propia

La densidad aparente de una harina es la densidad medida sin la influencia de ninguna fuerza de compresión y se reporta en g por cm³. La densidad aparente depende del efecto combinado de factores interrelacionados como la intensidad de las fuerzas de atracción entre partículas, el tamaño de partícula y el número de puntos de contacto (Bukya & Vijayakumar, 2013). Valores altos de densidad aparente en harinas sugieren su idoneidad para el uso en la preparación de productos alimenticios, mientras que valores bajos serían una ventaja para formulaciones alimentarias complementarias (Chandra *et al.*, 2015).

Además, el color juega un papel crucial en la aceptación de productos extrudidos por parte de los consumidores. Este parámetro se ve afectado por la composición del material y las condiciones de procesamiento utilizadas (Dalbhagat *et al.*, 2019). La determinación del color se basa en el efecto triestímulo, donde L* mide el brillo y varía de 100 para un blanco perfecto hasta cero para el negro. Las dimensiones de cromaticidad están dadas por los parámetros a* y b*. Un valor positivo de a* se asocia con el color rojo y uno negativo con el verde, mientras que un valor positivo de b* se asocia con el amarillo y uno negativo con el azul (Álvarez-Ossorio *et al.*, 2022).

Durante el proceso de extrusión ocurren algunas reacciones de pardeamiento no enzimático como la reacción de Maillard y la caramelización, así como la degradación de pigmentos que causan un cambio en la coloración al disminuir o aumentar la luminosidad (L*), el enrojecimiento (a*) y el amarillamiento (b*) (Becker *et al.*, 2014; Mehraj *et al.*, 2018; Dalbhagat *et al.*, 2019). La disminución en los valores de luminosidad (L*) en la harina extruida indica un aumento en la

opacidad de la harina, mientras que un incremento en el valor de ΔE en la harina de subproducto de ajonjolí extrudida indica un oscurecimiento debido al proceso de extrusión. El valor de ΔE depende tanto de la temperatura como del contenido de humedad del material, lo que significa que tratamientos a alta temperatura afectarán significativamente este parámetro del producto, mientras que altos niveles de humedad resultarán en un menor cambio de color (Dalbhagat *et al.*, 2019)

Caracterización tecno-funcional del subproducto de sésamo extrudido

Las propiedades tecno-funcionales son características decisivas para el lanzamiento de un nuevo producto alimenticio (Álvarez-Ossorio *et al.*, 2022). La Tabla 3 presenta el efecto del proceso de extrusión sobre las propiedades tecno-funcionales de la harina de subproducto de ajonjolí. Se puede observar que el proceso de extrusión no generó cambios significativos ($p > 0.05$) en el índice de absorción de agua (WAI), el índice de absorción de aceite (OAI) y la capacidad y estabilidad de la espuma; pero sí mostró un incremento significativo en el índice de solubilidad en agua (WSI), la dispersibilidad y la capacidad y estabilidad de emulsión.

El índice de absorción de agua (WAI) es una medida de la capacidad de retención de agua del almidón tras su hinchamiento debido al exceso de agua, y está relacionado con la hidrofobicidad y la capacidad de gelificación de biomacromoléculas como almidón y proteínas. Determina el volumen ocupado por el almidón después del hinchamiento e indica su integridad en dispersiones acuosas (Ye *et al.*, 2018; Dalbhagat *et al.*, 2019). Los valores bajos de WAI pueden deberse a una menor disponibilidad de aminoácidos polares en las harinas (Chandra *et al.*, 2015) y a la disminución del tamaño de molécula debido a la degradación del almidón (Dalbhagat *et al.*, 2019). El uso de altos contenidos de humedad induce un efecto plastificante en el material, retrasando el corte mecánico y reduciendo la gelatinización y degradación del almidón, lo que resulta en un incremento del WAI. Por el contrario, altas temperaturas y bajos contenidos de humedad disminuyen el WAI debido a una mayor prevalencia de la dextrinización sobre la gelatinización del almidón (Sharma *et al.*, 2017; Dalbhagat *et al.*, 2019).

Tabla 3. Efecto del proceso de extrusión sobre las propiedades tecno-funcionales de harina de subproducto de ajonjolí

Parámetro	USAF ¹	ESAF ²
Índice de absorción de agua (WAI) (g gel/g)	4.63 ± 0.04 ^a	4.25 ± 0.40 ^a
Índice de solubilidad en agua (WSI) (%)	9.68 ± 0.58 ^b	12.49 ± 1.21 ^a
Índice de absorción de aceite (OAI) (mL de aceite/ g)	1.43 ± 0.12 ^a	1.30 ± 0.11 ^a
Dispersabilidad (%)	40.83 ± 1.44 ^b	74.20 ± 2.47 ^a
Capacidad de formación de espuma (FFC) (%)	1.03 ± 0.05 ^a	1.00 ± 0.01 ^a
Estabilidad de espuma (FS) (%)	96.96 ± 5.24 ^a	99.34 ± 1.13 ^a
Actividad de emulsión (EA) (%)	28.56 ± 0.84 ^b	39.81 ± 2.98 ^a
Estabilidad de emulsión (ES) (%)	54.52 ± 5.06 ^b	63.88 ± 2.40 ^a

¹USAF = Harina de subproducto de ajonjolí crudo; ²ESAF = Harina de subproducto de ajonjolí extrudido. ^{a-b} Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de acuerdo con la prueba de Fisher.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el WSI (índice de solubilidad en agua) es una medida de la degradación del almidón durante el proceso de extrusión que da como resultado un aumento de polisacáridos solubles (Dalbhagat *et al.*, 2019) y es un indicador de la solubilidad de las moléculas presentes en el material (Udachan *et al.*, 2017); el WSI puede verse afectado por la formación de complejos amilosa-lípido y proteína-almidón durante los procesos térmicos (Du *et al.*, 2014). El WSI está asociado con la degradación del almidón durante el procesamiento térmico, lo que implica fusión, gelatinización, dextrinización y solubilidad del almidón (Natabirwa *et al.*, 2018; Dalbhagat *et al.*, 2019). Durante el proceso de extrusión ocurre una degradación macromolecular tanto de la amilosa como de la amilopectina, generando moléculas de bajo peso molecular, lo que resulta en un aumento de la solubilidad en agua del producto extrudido (Dalbhagat *et al.*, 2019; Ruiz-Armenta *et al.*, 2022). Un aumento en la temperatura de extrusión y la velocidad del tornillo provoca un incremento de la presión y de la fuerza de cizalla dentro del extrusor, intensificando la gelatinización y despolimerización del almidón, lo que se traduce en un aumento del WSI (Ali *et al.*, 2017).

Mientras tanto, el OAI (índice de absorción de aceite) está relacionado con la retención del sabor, la mejora de las propiedades de emulsión y la vida útil de los ingredientes funcionales (Álvarez-Ossorio *et al.*, 2022). También está asociado con los grupos hidrofóbicos de los productos extrudidos y la capacidad de mantener cierta cantidad de aceite en su estructura. En el proceso de extrusión, los gránulos de almidón se gelatinizan y el equilibrio hidrofílico/hidrofóbico cambia, modificando así la absorción de aceite (Becker *et al.*, 2014). Chandra *et al.* (2015) reportaron que

las proteínas son el componente principal de las harinas que afecta el índice de absorción de aceite debido a la presencia de partes hidrofóbicas e hidrofílicas en su composición, donde las cadenas laterales de aminoácidos no polares pueden formar interacciones hidrofóbicas con las cadenas hidrocarbonadas de los lípidos.

La dispersabilidad mostró un aumento significativo ($p < 0.05$) después del proceso de extrusión, incrementándose en un 81.7 %. La dispersabilidad depende del tamaño de partícula, porosidad, densidad del material y la composición química de la superficie de la partícula (Pismag *et al.*, 2024). Se ha informado que la temperatura de extrusión y el contenido de humedad de la muestra influyen en la dispersabilidad (Nahemiah *et al.*, 2016). Algunos autores han reportado un aumento en la dispersabilidad en materiales extruidos a altas temperaturas en mezclas arroz-caupí (Nahemiah *et al.*, 2016), arroz-soya (Nahemiah *et al.*, 2017) y mijo-soya (Fernandes *et al.*, 2003) con temperaturas de 100–180°C, 84–140°C y 95–150°C, respectivamente. La temperatura utilizada en este trabajo se encuentra dentro de los rangos reportados.

La propiedad de emulsión de un ingrediente depende de la técnica utilizada para la emulsificación, el tipo de aceite y la metodología para determinar la capacidad de emulsión (Álvarez-Ossorio *et al.*, 2022). La actividad de emulsión refleja la habilidad y capacidad de las proteínas para facilitar la formación de una emulsión, relacionándose con la capacidad de las proteínas de absorber el área interfacial entre el aceite y el agua (Du *et al.*, 2014; Chandra *et al.*, 2015). Mientras tanto, la estabilidad de la emulsión generalmente refleja la capacidad de las proteínas para fortalecer una emulsión, proporcionando resistencia al estrés y cambios, y también está relacionada con la resistencia del área interfacial durante un período determinado. Las diferencias entre la actividad y la estabilidad de emulsión están relacionadas con el contenido proteico y otros componentes como lípidos y esteroides. Las interacciones entre proteínas y agua ocurren en las regiones de aminoácidos polares de las moléculas de proteína, y la mayoría de las proteínas contienen diversas cadenas laterales polares con péptidos en las cadenas principales, lo que las hace hidrofóbicas, afectando su solubilidad y propiedades de emulsión (Du *et al.*, 2014). El aumento de la actividad emulsionante (EA), la estabilidad de emulsión (ES) y la retención de grasa durante el procesamiento son propiedades funcionales primarias de las proteínas en alimentos como productos cárnicos molidos, aderezos para ensalada, helados y mayonesa (Chandra *et al.*, 2015). Por otro lado, la formación y estabilidad de espuma dependen generalmente de la película interfacial formada por proteínas, la cual mantiene las burbujas de aire suspendidas y retrasa la velocidad de coalescencia. Las propiedades de espumado dependen de las proteínas y otros componentes como carbohidratos presentes en el material (Du *et al.*, 2014; Chandra *et al.*, 2015). Chandra *et al.* (2015) reportaron que harinas con alta capacidad de formación de espuma pueden formar burbujas de aire alargadas rodeadas por una película proteica más delgada y menos flexible, y estas burbujas pueden colapsar fácilmente y, en consecuencia, perder estabilidad de espuma.

Conclusiones

En este estudio, el proceso de extrusión llevado a cabo bajo condiciones de procesamiento optimizadas mantuvo la calidad nutricional de la harina de subproducto de ajonjolí, así como algunas características tecno-funcionales que sirven como indicadores para definir los tipos de productos alimenticios que podrían desarrollarse utilizando este material. El proceso de extrusión mejoró los contenidos de fibra dietaria soluble y total, así como el índice de solubilidad en agua, dispersabilidad, y actividad y estabilidad de emulsión de la harina de subproducto de ajonjolí. Estos resultados sugieren que podría utilizarse en la elaboración de una bebida funcional y/o un producto emulsionado. Es necesario desarrollar y evaluar este tipo de productos como una alternativa para su uso en productos comerciales con bajo contenido nutricional, además de agregar valor al subproducto de ajonjolí generado en la industria aceitera.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca posdoctoral otorgada a Gómez-Favela M.A., y a la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa por proporcionar los laboratorios e instalaciones para la realización del trabajo experimental.

Declaración de contribución de autoría

Conceptualización, G.F.M.A. y E.M.R.J.; Curación de datos, C.T.F.I.; Análisis formal, U.N.A.L., Q.S.M.F. y E.M.R.J.; Adquisición de fondos, G.F.M.A., E.M.R.J. y R.A.X.A.; Investigación, U.N.A.L., E.M.R.J., C.T.J.A. y Q.S.M.F.; Metodología, R.A.X.A., E.M.R.J. y C.T.F.I.; Supervisión, Q.S.M.F. y E.M.R.J.; Redacción – borrador original, R.A.X.A.; Redacción – revisión y edición, G.F.M.A.

“Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito”.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés. El manuscrito no ha sido sometido para publicación en otros medios con amplia circulación. Todos los trabajos previamente publicados citados en el manuscrito han sido debidamente reconocidos. Todos los autores han realizado contribuciones sustanciales al manuscrito y aprobaron la versión final para su envío. No existen conflictos de interés entre los autores y los revisores que evaluaron este manuscrito. La preparación de este manuscrito se realizó estrictamente de acuerdo con el formato de la revista establecido en la guía para autores.

Fuentes de financiación

Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de agencias de financiamiento del sector público, comercial o sin fines de lucro.

Referencias

- Association of Official Analytical Chemists [AOAC]. (2023). Official methods of analysis of AOAC International. 22nd Ed. New York, USA. Online edn, AOAC Publications, 4 Jan. 2023, <https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001>
- Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H., & Gupta, K. (2016). Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 445-473. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>
- Ali, S., Singh, B., & Sharma, S. (2017). Development of high-quality weaning food based on maize and chickpea by twin-screw extrusion process for low-income populations. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3), e12500. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12500>
- Álvarez-Ossorio, C., Orive, M., Sanmartín, E., Alvarez-Sabatel, S., Labidi, J., Zufia, J., & Bald, C. (2022). Composition and techno-functional properties of grape seed flour protein extracts. *ACS Food Science & Technology*, 2(1), 125-135. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00367>
- Arribas, C., Cabellos, B., Sánchez, C., Cuadrado, C., Guillamón, E., & Pedrosa, M. M. (2017). The impact of extrusion on the nutritional composition, dietary fiber and *in vitro* digestibility of gluten-free snacks based on rice, pea and carob flour blends. *Food & Function*, 8(10), 3654-3663. <https://doi.org/10.1039/C7FO00910K>
- Banerjee, A., Ganguly, S., Chatterjee, N., & Dhar, P. (2022). Evaluating the nutritional composition, anti-oxidative, and prebiotic properties of deoiled sesame and linseed meals. *Research Journal of Agricultural Science*, 13, 1639-1643. https://www.researchgate.net/profile/Pubali-Dhar/publication/364809140_Evaluating_the_Nutritional_Composition_Anti_oxidative_and_Prebiotic_Properties_of_de-oiled_Sesame_and_Linseed_Meals/links/635ab4c812cbac6a3e001bb7/Evaluating-the-Nutritional-Composition-Anti-oxidative-and-Prebiotic-Properties-of-de-oiled-Sesame-and-Linseed-Meals.pdf
- Becker, F. S., Eifert, E. D. C., Soares Junior, M. S., Tavares, J. A. S., & Carvalho, A. V. (2014). Physical and functional evaluation of extruded flours obtained from different rice genotypes. *Ciência e Agrotecnologia*, 38(4), 367-374. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000400007>
- Bukya, A., & Vijayakumar, T. P. (2013). Properties of industrial fractions of sesame seed (*Sesamum indicum* L.). *International Journal of Agricultural and Food Science*, 3(3), 86-89. https://www.academia.edu/7921670/Properties_of_industrial_fractions_of_sesame_seed_Sesamum_indicum_L_
- Chandra, S., Singh, S., & Kumari, D. (2015). Evaluation of functional properties of composite flours and sensorial attributes of composite flour biscuits. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 3681-3688. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1427-2>
- Costa do Nascimento, E. M. G., Piler Carvalho, C. W., Takeiti, C. Y., Castro Freitas, D. D. G., & Ramirez Ascheri, J. L. (2012). Use of sesame oil cake (*Sesamum indicum* L.) on corn expanded extrudates. *Food Research International*, 45(1), 434-443. <https://doi.org/10.1016/j.fri.2011.10.016>

- [foodres.2011.11.009](#)
- Dalbhagat, C. G., Mahato, D. K., & Mishra, H. N. (2019). Effect of extrusion processing on physicochemical, functional and nutritional characteristics of rice and rice-based products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 226-240. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.01.001>
- Du, S. K., Jiang, H., Yu, X., & Jane, J. L. (2014). Physicochemical and functional properties of whole legume flour. *LWT-Food Science and Technology*, 55(1), 308-313. <https://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2013.06.001>
- Elsorady, M. E. (2020). Characterization and functional properties of proteins isolated from flaxseed cake and sesame cake. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 12(1), 77-83. <https://doi.org/10.17508/CJFST.2020.12.1.10>
- Escobedo-Avellaneda, Z., Colin-Oviedo, Á., Buitimea-Cantúa, G. V., Pérez-Carrillo, E., Chuck-Hernández, C., Espinosa-Ramírez, J., Castagnini, J. M., & Welte-Chanes, J. (2025). Extrusion effects on composition, protein digestibility, and functional properties of cold-pressed oilseed cakes. *CyTA - Journal of Food*, 23 (1), 2549373. <https://doi.org/10.1080/19476337.2025.2549373>
- Fernandes, M. S., Wang, S. H., Ascheri, J. L. R., Oliveira, M. F., & Costa, S. A. J. (2003). Efeito da temperatura de extrusão na absorção de água, solubilidade e dispersibilidade da farinha précozida de milho-soja (70,30). *Food Science and Technology*, 23, 234–239. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612003000200023>
- Gómez-Favela, M. A., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., Partida-Preciado, R. A., Espinoza-Moreno, R. J., Preciado-Ortiz, R., & Gutiérrez-Dorado, R. (2021). Gluten-free healthy snack with high nutritional and nutraceutical value elaborated from a mixture of extruded underutilized grains (quality protein maize/tepary bean). *Acta Universitaria*, 31, <https://doi.org/10.15174/au.2021.3024>
- Grasso, S. (2020). Extruded snacks from industrial by-products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 284-294. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.012>
- Gulati, P., Brahma, S., & Rose, D. J. (2020). Impacts of extrusion processing on nutritional components in cereals and legumes: Carbohydrates, proteins, lipids, vitamins, and minerals. In Ganjyal, G. M. (Eds). *Extrusion cooking* (pp. 415-443). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02148-1>
- Huffman, V. L., Lee, C. K., & Burns, E. E. (1975). Selected functional properties of sunflower meal (*Helianthus annuus*). *Journal of Food Science*, 40(1), 70-74. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1975.tb03738.x>
- Kamau, E. H., Nkhata, S. G., & Ayua, E. O. (2020). Extrusion and nixtamalization conditions influence the magnitude of change in the nutrients and bioactive components of cereals and legumes. *Food Science & Nutrition*, 8(4), 1753-1765. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1473>
- Mehraj, M., Naik, H.R., Reshi, M., Mir, S.A., & Rouf, A. (2018). Development and evaluation of extruded production of extruded product of rice flour and apple pomace. *Development*, 13(1), 21–26. https://www.researchgate.net/profile/S-Mir/publication/325687779_Apple_pomace/links/5b1e4fba45851587f29fe6e1/Apple-pomace.pdf
- Melo, D., Álvarez-Ortí, M., Nunes, M. A., Costa, A. S., Machado, S., Alves, R. C., Pardo, J. E., & Oliveira, M. B. P. (2021). Whole or defatted sesame seeds (*Sesamum indicum* L.)? The effect of cold pressing on oil and cake quality. *Foods*, 10(9), 2108. [https://doi.org/10.3390/](https://doi.org/10.3390/10.3390/)

[foods10092108](#)

- Mora-Escobedo, R., Paredes-López, O., & Gutiérrez-López, G.F. (1991). Effect of germination on the rheological and functional properties of amaranth seeds. *LWT – Food Science and Technology*, 24(3), 241-246. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=5012274>
- Nagar, P., Agrawal, M., & Agrawal, K. (2022). Sesame (*Sesamum indicum* L.) seed as a functional food: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 11, 893-896. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue9/PartJ/11-8-328-594.pdf>
- Nahemiah, D., Nkama, I., Bada, M.H., Gbenyi, D.I., Idakwo, P.Y., Ndindeng, S.A., & Moreira, J. (2017). Multiple parameter optimization of hydration characteristics and proximate compositions of Rice-soybean extruded foods. *Open Access Library Journal*, 4, 1–22. <https://doi.org/10.4236/oalib.1102930>
- Nahemiah, D., Nkama, I., & Badau, M. (2016). Application of response surface methodology (RSM) for the production and optimization of extruded instant porridge from broken Rice fractions blended with cowpea. *International Journal of Food Nutrition and Food Sciences*, 5, 105–116. <https://doi.org/10.11648/j.ijnfs.20160502.13>
- Natabirwa, H., Muyonga, J. H., Nakimbugwe, D., & Lungaho, M. (2018). Physico-chemical properties and extrusion behaviour of selected common bean varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1492-1501. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8618>
- NOM (2007). Norma Oficial Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002. https://sitios1.dif.gob.mx/alimentacion/docs/NMX-FF-034-1-SCFI-2002_MAIZ_blanco.pdf
- Patil, S. S., & Kaur, C. (2018). Current trends in extrusion: Development of functional foods and novel ingredients. *Food Science and Technology Research*, 24(1), 23-34. <https://doi.org/10.3136/fstr.24.23>
- Pismag, R. Y., Rivera, J. D., Hoyos, J. L., Bravo, J. E., & Roa, D. F. (2024). Effect of extrusion cooking on physical and thermal properties of instant flours: a review. *Frontier in Sustainable Food System*, 8:1398908. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1398908>
- Quintero-Soto, M. F., Espinoza-Moreno, R. J., Félix-Medina, J. V., Salas-López, F., López-Carrera, C. F., Argüelles-López, O. D., Vázquez-Ontiveros, M.E., & Gómez-Favela, M. A. (2022). Comparison of phytochemical profile and *in vitro* bioactivity of beverages based on the unprocessed and extruded sesame (*Sesamum indicum* L.) seed byproduct. *Foods*, 11(20), 3175. <https://doi.org/10.3390/foods11203175>
- Rathod, R. P., & Annapure, U. S. (2017). Physicochemical properties, protein and starch digestibility of lentil based noodle prepared by using extrusion processing. *LWT- Food Science and Technology*, 80, 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.001>
- Ruiz-Armenta, X. A., Ruiz-Armenta, J. E., Espinoza-Moreno, R. J., Gutiérrez-Dorado, R., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. J., & Gómez-Favela, M. A. (2022). Use of sesame by-product and optimized extrusion to obtain a functional flour with improved techno-functional, nutritional and antioxidant properties. *Acta Universitaria*, 32, e3494. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3494>
- Sharma, C., Singh, B., Hussain, S. Z., & Sharma, S. (2017). Investigation of process and product parameters for physicochemical properties of rice and mung bean (*Vigna radiata*) flour based extruded snacks. *Journal of Food Science and Technology*, 54(6), 1711-1720. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2606-8>

- Sharma, L., Saini, C. S., Punia, S., Nain, V., & Sandhu, K. S. (2021). Sesame (*Sesamum indicum*) seed. In: Tanwar, B., Goyal, A. (Eds). *Oilseeds: health attributes and food applications* (pp. 305-330). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4194-0_12
- Takeungwongtrakul, S., Thavarang, P., & Sai-Ut, S. (2020). Development of strawberry gummy jelly with reduced sugar content from strawberry syrup. *International Journal of Agricultural Technology*, 16(5), 1267-1276. <https://li04.tci-thaijo.org/index.php/IJAT/article/view/7426/1404>
- Udachan, I., & Sahoo, A. K. (2017). Quality evaluation of gluten free protein rich broken rice pasta. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11, 1378-1385. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9516-3>
- Wang, P., Fu, Y., Wang, L., Saleh, A. S., Cao, H., & Xiao, Z. (2017). Effect of enrichment with stabilized rice bran and extrusion process on gelatinization and retrogradation properties of rice starch. *Starch-Stärke*, 69(7-8), 1600201. <https://doi.org/10.1002/star.201600201>
- Wang, S., Chao, C., Xiang, F., Zhang, X., Wang, S., & Copeland, L. (2018). New insights into gelatinization mechanisms of cereal endosperm starches. *Scientific Reports*, 8(1), 3011. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21451-5>
- Ye, J., Hu, X., Luo, S., Liu, W., Chen, J., Zeng, Z., & Liu, C. (2018). Properties of starch after extrusion: A review. *Starch-Stärke*, 70(11-12), 1700110. <https://doi.org/10.1002/star.201700110>