

Impacto de las condiciones de extrusión en las propiedades físicas de mezclas de amaranto-avena en la elaboración de botanas de tercera generación con valor funcional

Impact of extrusion conditions on the physical properties of amaranth-oat blends for the production of third-generation snacks with functional value

Rivera-Estrada, A.P.¹, Milán-Noris, E.M.^{1,2}, Milán-Noris, A.K.^{1,2}, Aguilar-Palazuelos, E.³, López-Díaz, A.³, Calderón-Castro, A.³,
Montoya-Rodríguez, A.^{1,2*}

¹Maestría en Ciencias de la Nutrición y Alimentos Medicinales, Facultad de Ciencias de la Nutrición y Gastronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. Cedros, Los Fresnos, Culiacán, Sinaloa, México. CP. 80019

²Programa de Posgrado Integral en Biotecnología, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. de las Américas y Josefa Ortiz S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México. CP. 80010

³Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. de las Américas y Josefa Ortiz S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México. CP. 80010

RESUMEN

El desarrollo de botanas de tercera generación a partir de materias primas con valor nutricional ha despertado interés para obtener productos con mejores características nutricionales. El amaranto y la avena destacan por compuestos de interés; aun así, su composición puede influir en el comportamiento de las mezclas durante la extrusión y afectar la expansión del producto, por lo que se requiere controlar las condiciones de proceso que determinan su capacidad de expansión. El objetivo fue evaluar el efecto de la proporción de avena/amaranto y la temperatura de extrusión sobre el índice de expansión de pellets, así como evaluar la influencia de la velocidad de tornillo. Se empleó un diseño central compuesto rotatable con 13 tratamientos, manteniendo 40% de almidón de maíz, y se realizaron pruebas complementarias a 100, 111, 126 y 141 rpm. Los pellets se obtuvieron mediante extrusión de doble tornillo y posteriormente se expandieron por microondas. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza y prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$). Después de la expansión, el índice de expansión de los tratamientos varió de 0.981 ± 0.057 a 1.302 ± 0.038 . En las pruebas de velocidad de tornillo, el mayor índice de expansión se obtuvo a 126 rpm (1.519 ± 0.074), mientras que a 141 rpm disminuyó a 1.418 ± 0.045 . Los resultados indican que la expansión dependió de las condiciones de procesamiento y la velocidad del tornillo ejerció un efecto significativo, con una respuesta no lineal después del calentamiento por microondas.

Palabras clave: Extrusión de alimentos, Amaranto, Avena, Expansión, Velocidad de tornillo

ABSTRACT

The development of third-generation snacks from raw materials with nutritional value has generated interest in obtaining products with improved nutritional characteristics. Amaranth and oat stand out for compounds of interest; even so, their composition can influence the behavior of the mixtures during extrusion and affect product expansion, so it is necessary to control the processing conditions that determine their expansion capacity. The objective was to evaluate the effect of the oat/amaranth ratio and extrusion temperature on the expansion index of pellets, as well as to evaluate the influence of screw speed. A rotatable central composite design with 13 treatments was used, maintaining 40% corn starch, and complementary test were carried out at 100, 111, 126, and 141 rpm. The pellets were obtained by twin-screw extrusion and subsequently expanded by microwave heating. The data were analyzed by analysis of variance and Fisher's least significant difference test ($p < 0.05$). After expansion, the expansion index of the treatments ranged from 0.981 ± 0.057 to 1.302 ± 0.038 . In the screw speed tests, the highest expansion index was obtained at 126 rpm (1.519 ± 0.074), while at 141 rpm it decreased to 1.418 ± 0.045 . The results indicate that expansion depended on the processing conditions and screw speed exerted a significant effect, with a non-linear response after microwave heating.

Keywords: Food extrusion, Amaranth, Oat, Expansion, Screw speed

INTRODUCCIÓN

La extrusión es una de las tecnologías más utilizadas en la industria alimentaria para la elaboración de productos expandidos (de manera directa o indirecta) debido a su versatilidad y eficiencia. En las botanas de segunda generación, la expansión ocurre directamente durante la extrusión, mientras que las botanas de tercera generación se obtienen inicialmente como pellets densos sin expandir, los cuales requieren una etapa térmica posterior e independiente, como el calentamiento por microondas (Neder-Suárez et al., 2021; Zambrano et al., 2024). Durante este proceso, las materias primas son sometidas a condiciones de temperatura, presión, humedad, cizallamiento y velocidad de tornillo (VT) que inducen cambios estructurales y fisicoquímicos como la gelatinización y degradación del almidón, la desnaturalización de proteínas, la formación de complejos amilosa-lípido, la absorción de agua, la solubilización de la fibra dietética y el desarrollo de reacciones de Maillard. Estas transformaciones modifican las propiedades reológicas del material y repercuten en las características físicas y funcionales de los productos extrudidos, particularmente en su textura y capacidad de expansión (Ding et al., 2006; Huang et al., 2024; Neder-Suárez et al., 2021; Nikinmaa et al., 2023; Qiu et al., 2024; Singha et al., 2018).

El almidón constituye uno de los principales componentes de cereales y pseudocereales utilizados en extrusión. Durante el procesamiento, los gránulos experimentan gelatinización modificando la organización estructural del almidón, mejorando las características de textura y sabor de los alimentos ricos en almidón (Singha et al., 2018; Qiu et al., 2024). La temperatura permite modificar el comportamiento de la viscosidad del material durante el procesamiento. Asimismo, el incremento de la velocidad del tornillo puede favorecer la gelatinización del almidón. Sin embargo, en condiciones excesivas, puede favorecer su degradación y reducir la viscosidad de la masa (Qiu et al., 2024). Bajo condiciones de alta temperatura y cizallamiento, el almidón se transforma en un material viscoelástico, lo cual es importante para el desarrollo de productos expandidos. Los productos expandidos al salir por la boquilla del extrusor sufren una disminución repentina de la presión que permite la vaporización de la humedad contenida en el material favoreciendo la expansión del producto. Sin embargo, otros componentes como las proteínas interactúan con el almidón y afectan la distribución del agua en la matriz, mientras que los lípidos pueden actuar como lubricantes, reduciendo la fricción entre el material y los tornillos del extrusor (Ilo et al., 2008; Dey et al., 2021).

En materias primas como la avena, el contenido de lípidos y otros

componentes estructurales puede limitar la transferencia de energía durante el procesamiento y afectar negativamente la expansión del producto, favoreciendo la formación de estructuras más compactas. No obstante, tanto la avena como el amaranto representan ingredientes de interés para el desarrollo de alimentos extrudidos debido a su aporte de compuestos nutricionalmente relevantes, como proteína, fibra dietética y compuestos bioactivos, por lo que resulta necesario evaluar estrategias de procesamiento que permitan mejorar sus características físicas y tecnológicas (Nikinmaa et al., 2023). La avena destaca por su contenido de β -glucanos, un tipo de fibra soluble que aumenta la viscosidad del contenido intestinal y puede retrasar la digestión y absorción de los carbohidratos. Su consumo puede disminuir la respuesta posprandial de glucosa e insulina, efecto que depende de factores como la cantidad ingerida, el peso molecular y las características del alimento que lo contiene. Estos resultados se han observado en personas con diabetes, por lo que la avena representa un ingrediente de interés para la elaboración de alimentos orientados al control de la glucemia (Pizarro et al., 2014; Zurbau et al., 2021).

Por su parte, el amaranto presenta un contenido de proteínas superior al de cereales comunes y de buena calidad nutricional debido al perfil de aminoácidos esenciales. Sus proteínas también pueden actuar como fuente de péptidos bioactivos relacionados con diferentes funciones metabólicas. Entre las secuencias estudiadas se han identificado péptidos con actividad potencial inhibidora de la dipeptidil peptidasa IV y estimuladora de la captación de glucosa. Estas características han fortalecido el interés por el amaranto como materia prima para el desarrollo de alimentos funcionales (Caselato-Sousa & Amaya-Farfán, 2012; Montoya-Rodríguez et al., 2015; Segura-Jiménez & Jacobo-Velázquez, 2025).

En las botanas de tercera generación, las propiedades físicas son indicadores importantes de calidad, ya que permiten evaluar el desarrollo de la estructura después de la expansión. Parámetros como la expansión, la densidad y la textura ayudan a relacionar las condiciones de procesamiento con las características finales del producto (Moraru & Kokini, 2003; Neder-Suárez et al., 2021; Zambrano et al., 2024). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la composición de mezclas de harina de amaranto y avena y de la temperatura de extrusión sobre la expansión de pellets destinados a botanas de tercera generación, así como evaluar la influencia de la velocidad del tornillo mediante ensayos adicionales. El aporte de este estudio consiste en generar información sobre el comportamiento de estas mezclas durante la obtención y expansión de los pellets, contribuyendo a

comprender la influencia de las condiciones de procesamiento sobre sus propiedades físicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Se utilizó harina de amaranto (*Amaranthus* spp.), harina de avena (*Avena sativa* L.) y almidón de maíz, adquiridos en Culiacán, Sinaloa, México. Las materias primas fueron molidas en un molino pulverizador (modelo 200, Pulvex S.A. de C.V., Ciudad de México, México) y posteriormente pesadas de acuerdo con las proporciones establecidas en el diseño experimental. Estas fueron acondicionadas a 28% de humedad. Las muestras se almacenaron durante 24 h hasta su uso (Limón-Valenzuela et al., 2017).

PROCESO DE EXTRUSIÓN Y OBTENCIÓN DE PELLETS

El proceso de extrusión y obtención de los pellets se realizó usando la metodología descrita por Limón-Valenzuela et al. (2017), con modificaciones. Las mezclas fueron procesadas en un extrusor de doble tornillo (modelo LT32L, Shandong Light, Jinan, China) y un diámetro de salida de 3.77 mm. Las temperaturas utilizadas fueron: entrada de 60 °C, temperatura de extrusión (TE) variable de 85 a 135 °C en la zona 2, de acuerdo con cada tratamiento experimental, y 72 °C en la salida. La velocidad del tornillo (VT) fue de 100 rpm durante los tratamientos iniciales. A la salida del dado, los extrudidos fueron cortados para obtener tiras continuas, las cuales se recolectaron y distribuyeron sobre mallas de secado. Las tiras se cortaron en pellets de 5 cm de longitud, se secaron a temperatura ambiente durante 24 h y se almacenaron hasta su expansión.

EXPANSIÓN DE LOS PELLETS

Para la expansión de los pellets se utilizó un horno de microondas convencional (modelo MS1149CS, LG, Monterrey, México), con un consumo de energía de 1450 W, una potencia de salida de microondas de 1000 W y una frecuencia de 2450 MHz siguiendo la metodología propuesta por Moraru & Kokini (2003). Para cada tratamiento, se realizaron pruebas de expansión en intervalos de tiempo de 20 a 40 segundos (cada 2 segundos). La evaluación se efectuó de manera visual, considerando el desarrollo estructural característico de las botanas de tercera generación. El tiempo de expansión se definió como el tiempo mínimo necesario para obtener una expansión uniforme y estable, sin evidencias de colapso estructural, zonas sin expandir ni quemaduras en el producto.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN

El índice de expansión se determinó tomando como referencia la metodología descrita por Gujska & Khan (1990). Para cada tratamiento se seleccionaron cinco pellets, de 5 cm longitud aproximadamente. El diámetro de cada pellet se midió con un vernier digital en tres puntos de la muestra: ambos extremos y la región central. A partir de estas mediciones se obtuvo el diámetro promedio de cada pellet. Para los pellets sin expandir, el índice de expansión se calculó como la relación entre el diámetro promedio del pellet y el diámetro interno del dado de la salida del extrusor correspondiente a 3.77 mm, de acuerdo con la ecuación (1):

$$IE_{SE} = \frac{DSE}{Dd} \quad (1)$$

donde:

IE_{SE} = índice de expansión del pellet sin expandir

D_{SE} = diámetro promedio del pellet sin expandir (mm)

D_d = diámetro interno del dado de salida del extrusor (mm)

Posteriormente, los pellets fueron sometidos al proceso de expansión por microondas y se determinó nuevamente su diámetro. El índice de expansión después del calentamiento se calculó mediante la relación entre el diámetro promedio del pellet expandido y el diámetro promedio inicial del pellet correspondiente al tratamiento, de acuerdo con la ecuación (2):

$$IE_E = \frac{DE}{DSE} \quad (2)$$

donde:

IE_E = índice de expansión del pellet después del calentamiento por microondas

D_E = diámetro promedio del pellet expandido (mm)

D_{SE} = diámetro promedio inicial del pellet sin expandir (mm)

Diseño experimental

Se empleó un Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR) con dos factores y cinco niveles, generando un total de 13 tratamientos experimentales, mediante el software Design-Expert versión 11. Se evaluaron dos variables independientes: la composición de la mezcla amaranto-avena (Factor A) y la temperatura de extrusión (Factor B). El almidón de maíz se mantuvo constante al 40% de la formulación total. El factor A correspondió a la relación avena/amaranto en el 60% restante de la formulación, variando desde 0% de avena y 60% de amaranto hasta 60% de avena y 0% de amaranto, incluyendo puntos factoriales, axiales y centrales. El factor B se evaluó en un intervalo de 85 a 135 °C. A partir de este diseño se obtuvieron los 13 tratamientos experimentales utilizados para evaluar el

comportamiento de las mezclas durante el proceso de extrusión. Las formulaciones y condiciones experimentales se presentan en la Tabla 1. Como parte del diseño experimental, se incorporó la evaluación de la VT para determinar su efecto sobre la formación de los pellets y su capacidad de expansión. Para esta evaluación se mantuvieron constantes la formulación, compuesta por 100 g de harina de amaranto y 100 g de harina de avena y la temperatura de extrusión a 100 °C, modificando únicamente la VT. Se evaluaron velocidades de 100, 111, 126 y 141 rpm, obteniéndose cuatro condiciones experimentales adicionales.

Tabla 1. Formulación de tratamientos y condiciones de extrusión.

Tratamientos	Almidón de maíz (%)	Factor 1 A: Avena (%)	Amaranto (%)	Factor 2 B: Temperatura (°C)
1	40	8.7868	51.2132	92.3223
2	40	51.2132	8.7868	92.3223
3	40	8.7868	51.2132	127.678
4	40	51.2132	8.7868	127.678
5	40	0	60	110
6	40	60	0	110
7	40	30	30	85
8	40	30	30	135
9	40	30	30	110
10	40	30	30	110
11	40	30	30	110
12	40	30	30	110
13	40	30	30	110

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los valores del índice de expansión se expresaron como media $\pm$ desviación estándar de cinco mediciones por tratamiento. Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA) y, cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD), con un nivel de significancia de $p < 0.05$. El análisis estadístico se realizó mediante el software STATGRAPHICS centurión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE EXTRUSIÓN

Con la finalidad de establecer las condiciones de procesamiento para la obtención de pellets de amaranto y avena con capacidad de expansión, se llevaron a cabo los tratamientos establecidos en el diseño experimental.

Se evaluó el efecto de la temperatura y de la composición de la mezcla sobre las características físicas y estructurales de los extrudidos. Los tratamientos fueron definidos mediante el diseño generado en el software Design-Expert, considerando diferentes combinaciones de ambas variables. Durante esta etapa se observó que los pellets obtenidos presentaban una capacidad de expansión limitada después del proceso de expansión térmica, lo que sugirió que las condiciones evaluadas inicialmente no eran suficientes para favorecer el desarrollo de una estructura expandida.

Visualmente, los extrudidos obtenidos mostraron estructuras delgadas, compactas y con diámetro reducido, además de una baja porosidad aparente. La mayor parte de las muestras conservaron formas lineales y rígidas, observándose superficies relativamente lisas y escaso desarrollo estructural. Con base en observaciones, se realizaron pruebas complementarias para evaluar el efecto de la velocidad del tornillo sobre el comportamiento del material durante la extrusión. Para ello, se empleó una formulación fija compuesta por 100 g de harina de amaranto y 100 g de harina de avena, manteniendo constante la temperatura de extrusión a 100 °C y modificando únicamente la velocidad del tornillo.

Estas pruebas permitieron identificar cambios en la formación de los pellets y en su capacidad de expansión, por lo que esta variable fue incorporada posteriormente al estudio para su evaluación.

EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

La disminución del índice de expansión puede ser debido a que las condiciones de procesamiento no favorecieron la gelatinización del almidón. Este comportamiento puede estar relacionado con una transferencia insuficiente de energía mecánica dentro del extrusor, así como con bajas fuerzas de cizalla sobre la matriz alimentaria. Cuando la energía mecánica aplicada es limitada, la mezcla presenta una menor transformación estructural y el almidón no alcanza un grado suficiente de gelatinización para formar una matriz capaz de retener el vapor.

La Figura 1 muestra los extrudidos obtenidos a partir de los tratamientos del diseño experimental, mientras que la Tabla 2 presenta los valores del índice de expansión (IE) de los pellets antes y después del calentamiento por microondas. En los pellets sin expandir se observaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$), con valores comprendidos entre 1.002 ± 0.016 y 1.198 ± 0.024 . El tratamiento T1 presentó el valor más alto, aunque no mostró diferencias significativas respecto a T4, T6, T11 y



Figura 1. Extrudidos obtenidos a partir de los tratamientos experimentales del Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR).

T12, debido a que compartieron al menos un grupo homogéneo. En contraste, T3 y T5 presentaron los valores más bajos. Después de la expansión por microondas, el IE varió de 0.981 ± 0.057 en T1 a 1.302 ± 0.038 en T2. Los tratamientos T2 y T6 se presentaron los valores numéricamente más altos, con 1.302 ± 0.038 y 1.277 ± 0.070 , respectivamente, mientras que T1 presentó el menor valor. La respuesta observada después del calentamiento definió de la registrada en los pellets sin expandir, lo que indica que el comportamiento de los tratamientos estuvo asociado con las condiciones de procesamiento y la composición de cada formulación.

Tabla 2. Índice de expansión (IE) de los pellets obtenidos en los tratamientos experimentales antes y después de la expansión por microondas.

Tratamientos	IE del pellet	IE del pellet expandido
T1	1.198 ± 0.024^a	0.981 ± 0.057^d
T2	1.138 ± 0.005^{cd}	1.302 ± 0.038^a
T3	1.002 ± 0.016^e	1.186 ± 0.052^c
T4	1.191 ± 0.021^{ab}	1.196 ± 0.104^{bc}
T5	1.021 ± 0.035^e	1.132 ± 0.094^c
T6	1.184 ± 0.019^{abc}	1.277 ± 0.070^{ab}
T7	1.145 ± 0.013^{bc}	1.210 ± 0.036^{bc}
T8	1.097 ± 0.042^d	1.142 ± 0.062^c
T9	1.149 ± 0.039^{bc}	1.128 ± 0.081^c
T10	1.140 ± 0.043^{cd}	1.199 ± 0.051^{bc}
T11	1.163 ± 0.054^{abc}	1.212 ± 0.084^{abc}
T12	1.162 ± 0.053^{abc}	1.212 ± 0.082^{abc}
T13	1.142 ± 0.065^{cd}	1.190 ± 0.083^{bc}

La Figura 2 muestra el comportamiento del IE en función de la proporción avena/amaranto y la temperatura de extrusión. En los pellets sin expandir, la respuesta varió de acuerdo con la combinación de ambas condiciones (Figura 2a). En las formulaciones con mayor proporción de amaranto, el aumento de la temperatura de 92.32°C a 127.68°C provocó una disminución del IE de 1.198 ± 0.024 en T1 a 1.002 ± 0.016 en T3. En comparación con las formulaciones con mayor proporción de avena, el índice incrementó de 1.138 ± 0.005 en T2 a 1.191 ± 0.021 en T4 al aumentar la temperatura en el mismo intervalo. Asimismo, a 110°C se observó una tendencia al aumento del índice conforme se incrementó la proporción de avena, con valores de 1.021 ± 0.035 en T5 y 1.184 ± 0.019 en T6 (Tabla 2).

Después del calentamiento por microondas, se observó una respuesta

dependiente de la composición y temperatura (Figura 2b). En las formulaciones con mayor proporción de amaranto, el IE incrementó de 0.981 ± 0.057 en T1 a 1.186 ± 0.052 en T3 conforme aumentó la temperatura. Por el contrario, en las formulaciones con mayor contenido de avena, el índice disminuyó de 1.301 ± 0.038 en T2 a 1.196 ± 0.104 en T4. A una temperatura de 110°C , el incremento de la proporción de avena de T5 a T6 aumentó el IE de 1.132 ± 0.094 a 1.277 ± 0.070 . En conjunto, estas tendencias indican que la respuesta de expansión no dependió de una sola variable, sino de la combinación entre la composición de la mezcla y la temperatura de extrusión.

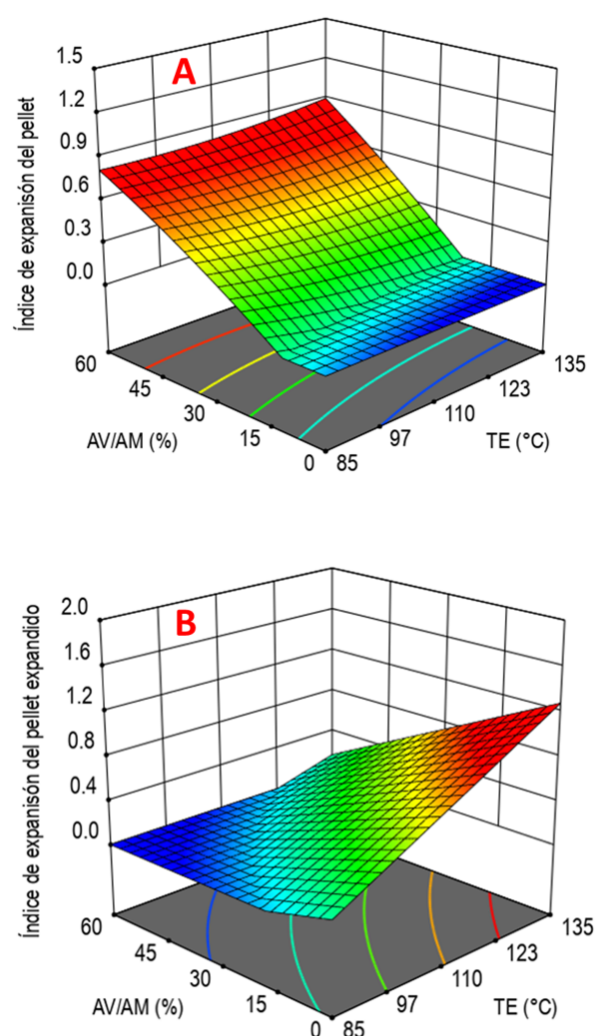


Figura 2. Efecto de la composición avena/amaranto (AV/AM) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el índice de expansión (IE) del pellet (A) y el pellet expandido (B).

Los tratamientos con mayor proporción de amaranto presentaron, en general, estructuras compactas y con menor desarrollo de volumen; sin embargo, la respuesta no fue uniforme entre estas formulaciones, T1 presentó el menor IE después del calentamiento, mientras que T3 alcanzó un valor de 1.186 ± 0.052 . Por lo tanto, la respuesta de expansión no puede atribuirse exclusivamente al contenido de amaranto. Por su parte, las formulaciones con mayor proporción de avena presentaron una apariencia más uniforme y T2 y T6 alcanzaron los mayores valores numéricos de IE después del calentamiento. Estos resultados respaldan parcialmente la tendencia visual observada, aunque la presencia de grupos homogéneos compartidos indica que las diferencias entre algunos tratamientos no fueron estadísticamente significativas. Por su parte, los tratamientos con proporciones intermedias de avena y amaranto presentaron un comportamiento similar, sin diferencias visuales marcadas entre las temperaturas evaluadas. Sin embargo, bajo las condiciones iniciales de procesamiento, las modificaciones en la composición y la temperatura no favorecieron de manera consistente el desarrollo de estructuras altamente expandidas. La limitada expansión observada en algunos tratamientos podría atribuirse a que las condiciones de procesamientos no favorecieron suficientemente la transformación de la matriz de almidón. La gelatinización y las propiedades reológicas desarrolladas durante la extrusión son determinantes para la formación de una matriz capaz de favorecer el crecimiento estructural del pellet; sin embargo, este comportamiento también depende de la interacción del almidón con los demás componentes presentes en la formulación (Dey et al., 2021; Mohamed, 2023).

La menor expansión observada en algunos tratamientos con mayor contenido de amaranto podría estar relacionada con su composición. Aunque este pseudocereal posee un importante valor nutricional, también aporta cantidades considerables de proteína y fibra, componentes que pueden modificar el comportamiento de la masa durante la extrusión (Ilo et al., 1999; Dey et al., 2021). Ilo et al. (1999) reportaron una disminución del IE, al incrementar la proporción de harina de amaranto en mezclas extruidas y la resistencia a la rotura del extrudido aumentó por lo que los mejores resultados se obtuvieron con un incremento de la VT. Asimismo, un contenido elevado de fibra puede disminuir la disponibilidad de agua para el almidón, limitando su gelatinización y dificultando la formación de una estructura capaz de retener el vapor generado durante el proceso. De acuerdo con Dey et al. (2021), cuando el contenido de fibra es elevado, las partículas fibrosas pueden interrumpir el desarrollo de las paredes

celulares y disminuir la expansión, favoreciendo productos con apariencia más compacta y menor volumen, un comportamiento similar al observado en los tratamientos con mayor proporción de amaranto.

Por otra parte, la respuesta de las formulaciones con mayor proporción de avena también puede estar asociada con la composición de este cereal. De acuerdo con Nikinmaa et al. (2023) y Brennan et al. (2008), la avena integral contiene cantidades importantes de fibra dietética insoluble, componente que puede dificultar la formación de estructuras aireadas durante la extrusión e interferir con la continuidad de la matriz de almidón necesaria para sostener el crecimiento de las celdas de aire. Además, la avena contiene lípidos que actúan como agentes lubricantes dentro del barril del extrusor, disminuyendo la transferencia de energía mecánica hacia la mezcla y una reducción de la velocidad de corte. Como consecuencia, la expansión tiende a verse limitada y se obtienen productos más densos, menos porosos y crujientes. Asimismo, concentraciones elevadas de lípidos pueden recubrir parcialmente los gránulos de almidón, dificultando la absorción de agua necesaria para su transformación. En conjunto, estas interacciones entre almidón, fibra, proteína y lípidos podrían explicar la limitada expansión y la apariencia compacta observada en los tratamientos evaluados (Dey et al., 2021). En general, la respuesta de expansión observada puede estar asociada con las interacciones entre los principales componentes de las materias primas. Tanto el amaranto como la avena aportan cantidades importantes de proteína y fibra y, en el caso de la avena, también aporta lípidos, componentes que pueden modificar el comportamiento del almidón durante la extrusión y reducir la disponibilidad de agua para la gelatinización durante la extrusión.

Aunque el almidón es el principal responsable de la expansión de los extrudidos, su desempeño depende de las interacciones que establece con otras macromoléculas presentes en la formulación. De acuerdo con Dey et al. (2021), Moraru & Kokini (2003), Allen et al. (2007), Day & Swanson (2013) y Offiah et al. (2019), las proteínas pueden desnaturalizarse durante la extrusión e interactuar con el almidón, modificando la distribución del agua dentro de la matriz y aumentando su resistencia mecánica. Shah et al. (2011), Quevedo et al. (2021) y Mohamed (2023) reportaron que formulaciones con mayores contenidos de proteína suelen presentar una menor capacidad de expansión debido a la formación de estructuras más rígidas, que dificultan el crecimiento de las burbujas de vapor durante la expansión. Sin embargo, otros estudios han señalado que un mayor cizallamiento durante la extrusión puede modificar este comportamiento, ya que

promueve la desnaturalización, favoreciendo así la expansión de los extrudidos.

La expansión de los productos extruidos depende en gran medida de la cantidad de agua disponible y de los cambios de presión que ocurren cuando el material abandona el dado del extrusor. La disminución repentina de presión favorece la rápida evaporación de la humedad retenida en el extrudido, generando una estructura expandida (Gu et al., 2017; Dey et al., 2021). Durante el proceso, el almidón gelatinizado forma una matriz viscoelástica capaz de retener agua en forma de vapor bajo condiciones de alta temperatura y presión, lo cual es de importancia ya que la disponibilidad de agua desempeña un papel fundamental en la expansión de los extrudidos (Ye et al., 2018; Dey et al., 2021). Mohamed (2023) menciona que cuando parte de la humedad es retenida por componentes como la fibra o las proteínas, disminuye la cantidad de agua capaz de evaporarse al salir del dado. En consecuencia, una menor formación de vapor reduce la fuerza de expansión y limita el crecimiento de las celdas de aire y da lugar a productos más compactos, reduciendo la fuerza de expansión. De acuerdo con Mohamed (2023), la diferencia de presión de vapor es uno de los principales factores que determinan el grado de expansión, efecto que suele intensificarse a medida que aumenta la temperatura del material procesado. Además, menciona que menos agua disponible para el almidón, disminuye la gelatinización y modifica la expansión. Por lo que, cualquier condición que reduzca la generación o la retención de vapor puede afectar negativamente el volumen final del producto.

EFFECTO DE LA VELOCIDAD DEL TORNILLO SOBRE LA EXPANSIÓN

La Figura 3 muestra los extrudidos obtenidos a diferentes VT, mientras que la Figura 4 presenta la tendencia del IE en función de esta variable, mientras que la Tabla 3 presenta los valores del IE y su comparación estadística. En los pellets sin expandir se observó una tendencia creciente del IE a medida que incrementó la VT (Figura 4a). El índice aumentó de 1.166 ± 0.033 a 100 rpm hasta 1.717 ± 0.110 a 141 rpm, donde se registró el valor significativamente más alto. Las condiciones de 111 y 126 rpm presentaron valores intermedios de 1.414 ± 0.038 y 1.423 ± 0.064 , respectivamente, sin diferencias significativas entre sí (Tabla 3).

Después del calentamiento por microondas, la tendencia fue diferente debido a que el IE aumentó de 1.165 ± 0.053 a 100 rpm a 1.242 ± 0.105 a 111 rpm y alcanzó su valor máximo a 126 rpm, con 1.519 ± 0.074 (Figura 4b). Sin embargo, al incrementar la velocidad a 141 rpm, el índice disminuyó a 1.418 ± 0.045 . Este comportamiento confirma que la respuesta de expansión después del

calentamiento no fue lineal y dentro del intervalo evaluado, 126 rpm produjo el mayor IE.

Tabla 3. Índice de expansión (IE) de los pellets obtenidos a diferentes velocidades de tornillo (VT) antes y después de la expansión por microondas.

VT (rpm)	IE del pellet	IE del pellet expandido
100	1.166 ± 0.033^c	1.165 ± 0.053^c
111	1.414 ± 0.038^b	1.242 ± 0.105^c
126	1.423 ± 0.064^b	1.519 ± 0.074^a
141	1.717 ± 0.110^a	1.418 ± 0.045^b

La velocidad del tornillo produjo diferencias significativas en el IE de los pellets ($p < 0.05$) (Tabla 3). Antes del calentamiento por microondas, el IE aumentó de 1.166 ± 0.033 a 100 rpm hasta 1.717 ± 0.110 a 141 rpm. Las condiciones de 111 y 126 rpm no presentaron diferencias significativas entre sí, mientras que 141 rpm mostró el valor significativamente más alto.

manera general, se observó que el incremento de la velocidad favoreció el desarrollo estructural de las muestras, reflejándose en un mayor diámetro y una apariencia más expandida en comparación con los tratamientos obtenidos a velocidades más bajas. Después del calentamiento por microondas, la respuesta no mostró un comportamiento lineal con la VT. El mayor IE se obtuvo a 126 rpm (1.519 ± 0.074), siendo significativamente superior al observado a las demás velocidades. Al incrementar la VT a 141 rpm, el IE disminuyó a 1.418 ± 0.045 , aunque permaneció significativamente por encima de los valores obtenidos a 100 y 111 rpm. Estas últimas velocidades presentaron los menores índices de expansión y no mostraron diferencias significativas entre sí. Estos resultados indican que el incremento de la VT favoreció la expansión hasta 126 rpm bajo las condiciones evaluadas, mientras que un aumento adicional no produjo una mejora en esta respuesta.

El comportamiento observado podría estar relacionado con una mayor transferencia de energía mecánica al material durante la extrusión (Singha et al., 2018; Nikinmaa et al., 2023). El incremento de la VT incrementa las fuerzas de cizalla y la fricción dentro del barril, promoviendo una transformación más intensa de la matriz alimentaria. Una posible explicación para la mayor expansión observada a velocidades elevadas del tornillo es el incremento de las fuerzas de cizalla dentro del extrusor. Estas fuerzas promueven modificaciones en la estructura de las proteínas y favorecen la gelatinización del almidón, permitiendo la formación

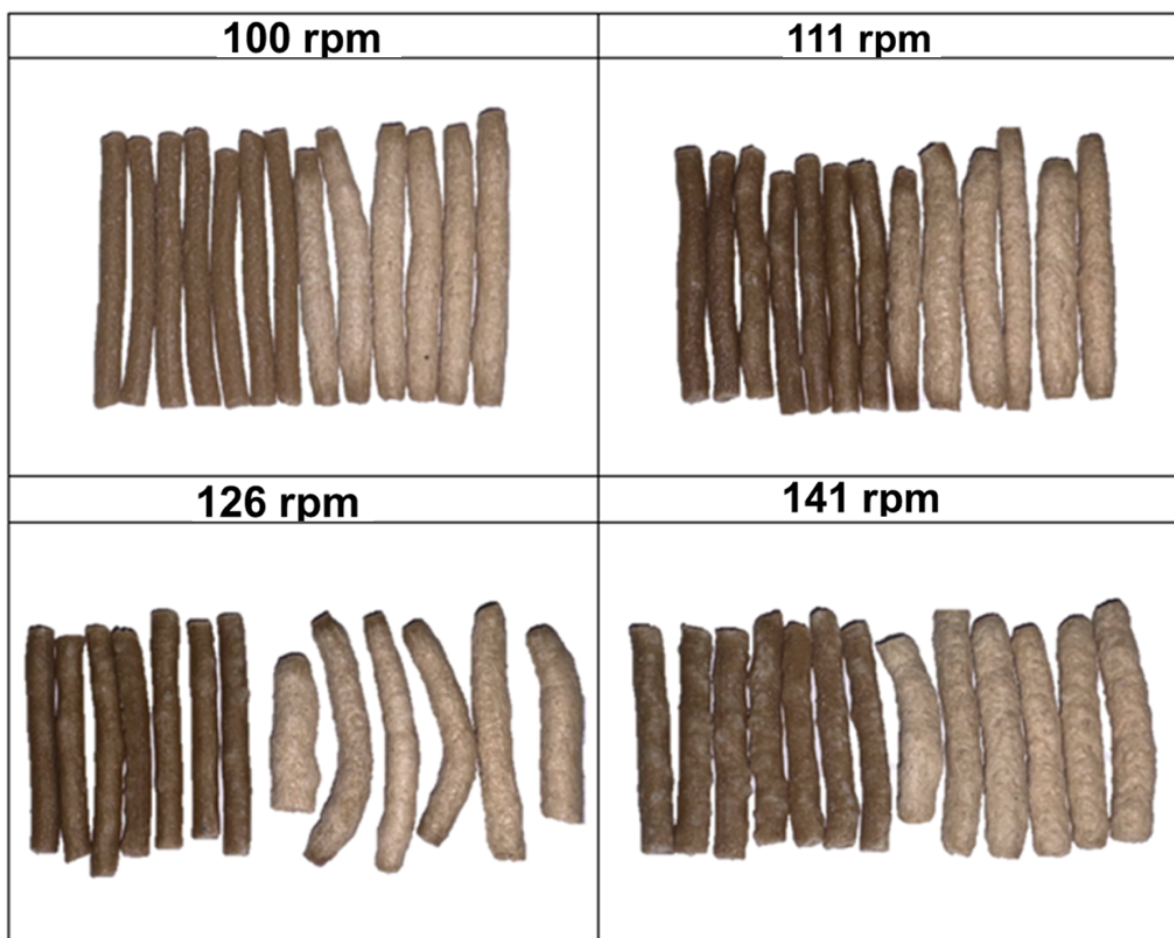


Figura 3. Extrudados obtenidos a diferentes velocidades de tornillo (100, 111, 126 y 141 rpm) bajo condiciones constantes de formulación y temperatura de extrusión.

de una matriz más adecuada para retener el vapor generado durante el proceso. Como resultado, se obtienen extrudidos con un mayor desarrollo estructural y una expansión más pronunciada (Singha et al., 2018). El efecto positivo de la velocidad del tornillo sobre la expansión también ha sido documentado en sistemas a base de avena. Liu et al. (2000), Moisis et al. (2015), Brahma et al. (2016), Wang et al. (2019) y Nikinmaa et al. (2023) observaron que velocidades de tornillo más elevadas favorecieron el desarrollo de estructuras más expandidas. De acuerdo con Dey et al. (2021), bajo condiciones de alta temperatura y cizallamiento, el almidón experimenta procesos de gelatinización y transformación estructural que favorecen la formación de una matriz viscoelástica con mayor capacidad de expansión. Asimismo, una mayor energía mecánica y alto cizallamiento pueden favorecer la retención de humedad en forma de vapor dentro de la matriz antes de la salida del dado. Cuando el extrudido abandona el sistema, la disminución repentina de presión provoca la rápida vaporización del agua retenida, generando el crecimiento de las celdas de aire responsables de la expansión del producto (Dey et al., 2021). No obstante, la disminución del índice de expansión al incrementar la velocidad de 126 rpm a 141 rpm evidencia que la respuesta no fue lineal. Un tratamiento mecánico más intenso, puede generar una mayor transformación de la matriz, modificar su comportamiento reológico y reducir su capacidad para mantener una estructura expandida estable (Singha et al., 2018; Qiu et al., 2024). Por lo tanto, el efecto de la VT depende del equilibrio entre la transformación estructural de la matriz y las condiciones necesarias para favorecer la expansión. Los resultados de las pruebas complementarias mostraron que la modificación de la VT produjo cambios significativos en la respuesta de expansión de los pellets. El incremento de la velocidad probablemente favoreció una mayor transformación del almidón y una mejor retención del vapor generado durante el proceso, contribuyendo al desarrollo de estructuras con mayor volumen y expansión aparente.

CONCLUSIONES

Las condiciones de formulación y temperatura de extrusión influyeron en el IE de los pellets; sin embargo, las condiciones evaluadas no favorecieron de manera consistente el desarrollo de estructuras altamente expandidas después del calentamiento por microondas. La VT modificó significativamente la respuesta de expansión, obteniéndose el mayor índice a 126 rpm (1.519 ± 0.074). Al incrementar la velocidad a 141 rpm, el IE disminuyó a 1.418 ± 0.045 , evidenciando una respuesta no lineal. Estos resultados

muestran que la VT constituye una variable relevante en el desarrollo estructural de pellets elaborados con amaranto y avena y que, dentro del intervalo estudiado, 126 rpm representó la mayor respuesta de expansión. Los resultados obtenidos pueden contribuir al establecimiento de condiciones de procesamiento para el desarrollo de botanas de tercera generación con mejores propiedades físicas.

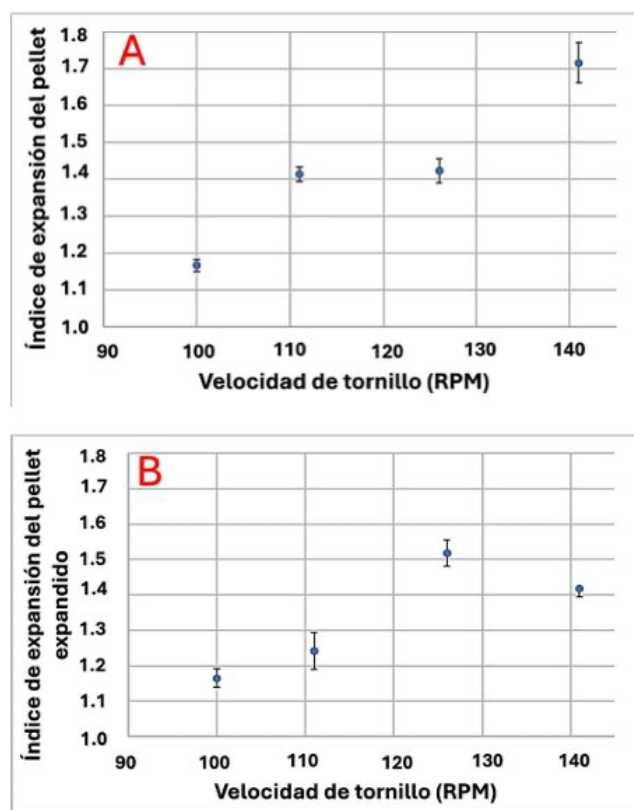


Figura 4. Índice de expansión del pellet (A) y el pellet expandido (B) en función de la velocidad del tornillo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas y Facultad de Ciencias de la Nutrición y Gastronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa por las facilidades brindadas para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradecen al personal académico y técnico que contribuyó con su apoyo durante las actividades experimentales y el desarrollo del presente trabajo. Los autores (Milán-Noris E.M., Milán-Noris A.K., y Montoya-Rodríguez A.) son miembros de la Red INNOPROT fundada por CYTED (ref. 124RT0164).

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés financiero, personal o profesional que pudiera haber influido en el diseño, desarrollo, análisis o presentación de los resultados de esta investigación.

REFERENCIAS

- Allen, K. E., Carpenter, C. E., & Walsh, M. K. (2007). Influence of protein level and starch type on an extrusion-expanded whey product. *International Journal of Food Science & Technology*, 42(8), 953-960. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01316.x>
- Brahma, S., Weier, S. A., & Rose, D. J. (2016). Effects of selected extrusion parameters on physicochemical properties and in vitro starch digestibility and β -glucan extractability of whole grain oats. *Journal of Cereal Science*, 70, 85-90. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.05.001>
- Brennan, M. A., Monro, J. A., & Brennan, C. S. (2008). Effect of inclusion of soluble and insoluble fibres into extruded breakfast cereal products made with reverse screw configuration. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(12), 2278-2288. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01867.x>
- Caselato-Sousa, V. M., & Amaya-Farfán, J. (2012). State of knowledge on amaranth grain: A comprehensive review. *Journal of Food Science*, 77(4), R93-R104. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x>
- Day, L., & Swanson, B. G. (2013). Functionality of protein-fortified extrudates. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(5), 546-558. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12023>
- Dey, D., Richter, J. K., Ek, P., Gu, B. J., & Ganjyal, G. M. (2021). Utilization of food processing by-products in extrusion processing: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 603751. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.603751>
- Ding, Q. B., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G., & Marson, H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, 73(2), 142-148. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.013>
- Gu, B. J., Wolcott, M. P., & Ganjyal, G. M. (2020). Optimized screw profile design proved to inhibit re-agglomeration that occurs during extrusion of fine-milled forest residuals for producing fermentable sugars. *Industrial Crops and Products*, 154, 112730. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112730>
- Gujaska, E., & Khan, K. (1990). Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fractions of navy, pinto and garbanzo beans. *Journal of Food Science*, 55, 466-469. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb06788.x>
- Huang, Y., Liu, L., Sun, B., Zhu, Y., Lv, M., Li, Y., & Zhu, X. (2024). A comprehensive review on harnessing soy proteins in the manufacture of healthy foods through extrusion. *Foods*, 13(14), 2215. <https://doi.org/10.3390/foods13142215>
- Ilo, S., Liu, Y., & Berghofer, E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. *LWT - Food Science and Technology*, 32(2), 79-88. <https://doi.org/10.1006/fstl.1998.0497>
- Ilo, S., Schoenlechner, R., & Berghofer, E. (2000). Role of lipids in the extrusion cooking processes. *Grasas y Aceites*, 51(1-2), 97-110. <https://doi.org/10.3989/gya.2000.v51.i1-2.410>
- Limón-Valenzuela, V., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. de J., & Martínez-Bustos, F. (2017). Propiedades microestructurales y de formación de pasta de pellets extrudidos elaborados a partir de almidón de maíz enriquecidos con MCP y concentrado proteínico de leche. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), 193-205.
- Liu, Y., Hsieh, F., & Heymann, H. (2000). Effect of process conditions on the physical and sensory properties of extruded oat-corn puff. *Journal of Food Science*, 65(7), 1253-1259. <https://doi.org/10.1111/j.13652621.2000.tb10274.x>
- Mohamed, I. O. (2023). Interaction of starch with some food macromolecules during the extrusion process and its effect on modulating physicochemical and digestible properties: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100294>
- Moisio, T., Forssell, P., Partanen, R., Damerau, A., & Hill, S. E. (2015). Reorganization of starch, proteins and lipids in extrusion of oats. *Journal of Cereal Science*, 64, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.04.001>
- Montoya-Rodríguez, A., Gómez-Favela, M. A., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., & González de Mejía, E. (2015). Identification of bioactive peptide sequences from amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) seed proteins and their potential role in the prevention of chronic diseases. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(2), 139-158. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12125>
- Moraru, C. L., & Kokini, J. L. (2003). Nucleation and expansion during

- extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2(4), 120–138. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00020.x>
- Neder-Suárez, D., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C. O., Zazueta-Morales, J. J., Paraguay-Delgado, F., & Ruiz-Gutiérrez, M. G. (2021). Evaluation of the physicochemical properties of third-generation snacks made from blue corn, black beans, and sweet chard produced by extrusion. *LWT – Food Science and Technology*, 146, 111414. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111414>
- Nikinmaa, M., Zehnder-Wyss, O., Nyström, L., & Sozer, N. (2023). Effect of extrusion processing parameters on structure, texture and dietary fibre composition of directly expanded wholegrain oat-based matrices. *LWT – Food Science and Technology*, 184, 114972. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114972>
- Offiah, V., Kontogiorgos, V., & Falade, K. O. (2019). Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(18), 2979–2998. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007>
- Pizarro, S., Ronco, A. M., & Gotteland, M. (2014). β -glucanos: ¿qué tipos existen y cuáles son sus beneficios en la salud? *Revista Chilena de Nutrición*, 41(4), 439–446. <https://dx.doi.org/10.4067/S071775182014000400014>
- Qiu, C., Hu, H., Chen, B., Lin, Q., Ji, H., & Jin, Z. (2024). Research progress on the physicochemical properties of starch-based foods by extrusion processing. *Foods*, 13(22), 3677. <https://doi.org/10.3390/foods13223677>
- Quevedo, M., Karbstein, H. P., & Emin, M. A. (2021). Influence of thermomechanical treatment and pH on the denaturation kinetics of highly concentrated whey protein isolate. *Journal of Food Engineering*, 292, 110294. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110294>
- Segura-Jiménez, M. E., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2025). *Amaranthus* spp.: A multifunctional crop at the nexus of nutrition, health, and sustainable innovation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 24, 102322. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102322>
- Shah, A., Zhang, G., Hamaker, B. R., & Campanella, O. H. (2011). Rheological properties of a soluble self-assembled complex from starch, protein and free fatty acids. *Journal of Food Engineering*, 105(3), 499–506. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.02.048>
- Singha, P., Singh, S. K., Muthukumarappan, K., & Krishnan, P. (2018). Physicochemical and nutritional properties of extrudates from food-grade distiller's dried grains, garbanzo flour, and corn grits. *Food Science & Nutrition*, 6(7), 1918–1929. <https://doi.org/10.1002/fsn3.769>
- Wang, J. M., Xia, S., Wang, B., Ali, F., & Li, X. (2019). Effect of twin-screw extrusion on gelatinization characteristics of oat powder. *Journal of Food Process Engineering*, 42(2), e13014. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13014>
- Ye, J., Hu, X., Luo, S. J., Liu, W., Chen, J., Zeng, Z., & Liu, C. M. (2018). Properties of starch after extrusion: A review. *Starch/Stärke*, 70(11–12), 1700110. <https://doi.org/10.1002/star.201700110>
- Zambrano, Y., Mariotti-Celis, M. S., & Bouchon, P. (2024). 3G extruded snacks enriched with catechin for high antioxidant capacity. *LWT – Food Science and Technology*, 192, 115674. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115674>
- Zurbau, A., Noronha, J. C., Khan, T. A., Sievenpiper, J. L., & Wolever, T. M. S. (2021). The effect of oat β -glucan on postprandial blood glucose and insulin responses: a systematic review and meta-analysis. *European Journal of Clinical Nutrition*, 75(11), 1540–1554. <https://doi.org/10.1038/s41430-021-00875-9>