

OBTENCIÓN SUSTENTABLE DE EXTRACTOS ACUOSOS DE SALVADO DE TRIGO SUSTITUYENDO LAVADO Y SECADO POR MOLIENDA PARCIAL

SUSTAINABLE OBTAINING OF AQUEOUS EXTRACTS OF WHEAT BRAN BY REPLACING WASHING AND DRYING BY PARTIAL MILLING

**René R. Balandrán-Quintana^{1,*}, Ana M. Mendoza-Wilson¹, José A. Azamar-Barrios²,
José Á. Huerta-Ocampo³, Gabriela R. Clamont-Montfort³**

(1) Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal. Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, Hermosillo, Sonora - México

(2) Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN-Unidad Mérida. Departamento de Física Aplicada. Carretera Antigua a Progreso km 6, Mérida, Yucatán - México

(3) Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Coordinación de Ciencia de los Alimentos. Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, Hermosillo, Sonora - México

(*e-mail: rbalandran@ciad.mx)

Recibido: 17/05/2022 - Evaluado: 11/06/2022 - Aceptado: 26/06/2022

RESUMEN

Se compararon dos pretratamientos en el proceso de obtención de extractos acuosos de salvado de trigo. Un lote de salvado se sometió al proceso convencional de cernido, lavado, secado, extracción acuosa, centrifugado y liofilización. Un segundo lote se molió parcialmente, para después cernirse y pasar directamente al paso de extracción acuosa. Se comparó el gasto de energía y agua, rendimiento en peso, contenido de proteínas, almidón y ácido fítico de los extractos acuosos, entre pretratamientos. Un mayor rendimiento de extractos y contenido de ácido fítico, así como un menor gasto de energía y agua, en el pretratamiento con molienda parcial, sugiere sustituir las etapas de lavado y secado por la molienda parcial para hacer un proceso más sustentable. El contenido de proteínas y almidón no fue significativamente diferente entre pretratamientos. Después de la extracción acuosa se precipitó una fracción rica en almidón.

ABSTRACT

Two pretreatments were compared in the process of obtaining aqueous extracts of wheat bran. A batch of bran was subjected to the conventional process of sifting, washing, drying, aqueous extraction, centrifugation and lyophilization. A second batch was partially ground, then screened and passed directly to the aqueous extraction step. Energy and water expenditure, weight yield, protein, starch and phytic acid content of the aqueous extracts were compared between pretreatments. A higher yield of extracts and phytic acid content, as well as a lower expenditure of energy and water, in the pretreatment with partial grinding, suggests replacing the washing and drying steps with partial grinding to make a more sustainable process. The protein and starch content were not significantly different between pretreatments. After aqueous extraction, a starch-rich fraction precipitated.

Palabras clave: extracción acuosa, residuos agroindustriales, sustentabilidad, valorización
Key words: aqueous extraction, agro-industrial waste, sustainability, recovery

INTRODUCCIÓN

Durante la molienda de trigo se obtiene salvado de trigo (ST) como subproducto principal (Glaser *et al.*, 2023). De acuerdo con la producción mundial de trigo en 2021 (FAOSTAT, 2023) y considerando que aproximadamente el 66% de esta producción se destina a la molienda, se estima una generación anual mundial de 127 millones de toneladas de ST. Un 90% del ST se destina como alimento a la crianza extensiva de animales, como las aves y los cerdos (Baladrán-Quintana *et al.*, 2015). El ST contiene en promedio 15% de proteínas y 1% de fósforo, un 90% de este último está en forma de ácido fítico, el cual es un factor antinutricional debido a su capacidad de quelar minerales esenciales, como el Zn (Alkandari *et al.*, 2021). Tanto las proteínas como el fósforo del ácido fítico son pobremente biodisponibles ya que forman parte de complejos moleculares y los animales monogástricos carecen de las enzimas necesarias para liberarlos de ese entorno (Li *et al.*, 2023). El resultado es que toda esa materia orgánica se excreta en forma inalterada y termina en suelos, lagos, ríos y mantos acuíferos, donde causa problemas ambientales y representa un riesgo para la vida de los organismos acuáticos (Mallin, 2000). Se ha realizado mucha investigación al respecto, sin que a la fecha haya una solución definitiva.

Algunos autores han propuesto aplicar el concepto de biorrefinación para utilizar los componentes del ST en diferentes procesos industriales (Aprich *et al.*, 2014). La extracción de la proteína total del ST es particularmente difícil debido a barreras impuestas por las paredes celulares, por lo que se utilizan métodos químicos agresivos o sofisticados y caros (Janssen *et al.*, 2023). Lo mismo aplica para el ácido fítico, el cual consiste en una molécula de mioinositol con 6 grupos fosfato cargados negativamente, pudiendo formar complejos con proteínas a través de puentes con iones divalentes (Venkataraman & Vaidyanathan, 2023; Gupta *et al.*, 2015). En un contexto de sustentabilidad, para el aprovechamiento de las proteínas solubles en agua y el ácido fítico del ST se ha reportado la extracción acuosa en frío de estos componentes y su posterior uso en la elaboración de nanopartículas proteicas y de biominerales de fosfato de calcio, ambos con potenciales aplicaciones industriales (Luna-Valdez *et al.*, 2021; Zavala-Corrales *et al.*, 2020; Chaquilla-Quilca *et al.*, 2016). Para ello, se obtienen extractos acuosos de salvado de trigo (EAST) mediante un método estandarizado que consiste en cernir el ST bruto, un posterior lavado con agua, secado a 40 °C, extracción acuosa a 5 °C y liofilización. Durante este proceso se obtienen residuos que son desechados, ya que el objetivo principal es recuperar el extracto acuoso; no obstante, esos residuos pueden ser susceptibles de valor agregado.

Un inconveniente de este proceso es el gasto de agua y energía durante las etapas de lavado y secado. De hecho, se estima que el secado consume entre el 20 y 30% de la energía total en la industria de los alimentos (Merone *et al.*, 2020). En el contexto del calentamiento global y el déficit hídrico, es necesario implementar procesos ahorradores de energía y agua (Atuonwu *et al.*, 2019). No se han reportado variantes del método de preparación del ST, previo a la extracción acuosa para la obtención de EAST. Tampoco se han cuantificado algunos componentes de los residuos en cada etapa del proceso que son de interés en este contexto: proteínas, almidón y ácido fítico. Esto último puede derivar en la integración de un proceso más completo de biorrefinación y hacer el proceso más sustentable.

El objetivo del presente trabajo fue investigar el efecto de dos variantes de preparación del ST, previo a la extracción acuosa, sobre el rendimiento en peso de los extractos liofilizados, el gasto de energía y agua, así como el contenido de almidón, proteínas y ácido fítico de los residuos obtenidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó ST grado consumo humano, proveniente de trigo harinero cosecha 2022 y adquirido en un molino local el mismo día de su producción. Los reactivos utilizados fueron de la marca Sigma (Sigma-Aldrich, Co., St. Louis, MO), a menos que se indique lo contrario. El agua HPLC utilizada para hacer los lavados y extracciones del ST se obtuvo en la planta de purificación de agua de la institución (CIAD). La preparación de reactivos se hizo con agua ultrapura Tipo I, obtenida con un equipo Wasserlab (Wasserlab-Water Purification Systems, ES). Para el experimento, se realizaron dos métodos de preparación del ST, como se describe a continuación y se esquematiza en la Figura 1.

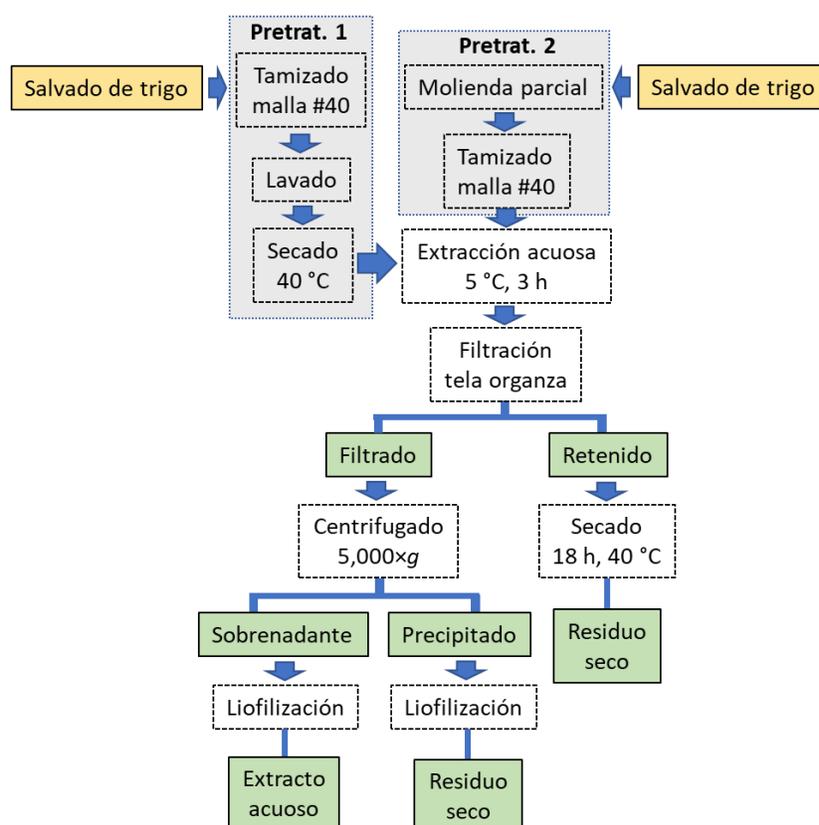


Fig. 1: Diagrama de proceso para la obtención de extractos acuosos de salvado de trigo, sometido a dos tratamientos previos a la extracción.

El primer método es el convencional, de acuerdo con Zavala-Corrales *et al.* (2020). Un lote de peso conocido de ST se cernió a través de malla #40 (0.425 mm) para remover partículas finas y restos de harina. La fracción retenida en la malla se recuperó y se pesó para calcular rendimientos en el cernido. Posteriormente se lavó con agua HPLC para eliminar al máximo los restos de harina (relación 1:10, p/v) y luego se secó a 40 °C durante 18 h en una estufa de convección natural (VWR Intl., MX). Después de enfriar, el ST lavado y seco se pesó para calcular rendimientos en el paso de lavado y secado. Por último, se almacenó a -20 °C hasta su posterior uso.

En el segundo método, un lote de ST en bruto se sometió primero a molienda parcial con un procesador de alimentos tipo Multibraun, durante 3 ciclos de 20 s cada uno. La finalidad fue explorar la posibilidad de sustituir el paso de lavado en la remoción de residuos de harina, así como el secado, con lo que se ahorraría agua y energía. Las partículas de harina se desprenden de las hojuelas del ST debido al efecto de abrasión de las aspas del Multibraun, sin que haya una reducción significativa del tamaño de las hojuelas. Después de la molienda parcial, el lote de ST se cernió a través de malla #40 para separar las partículas más finas. La fracción retenida en la malla se pesó para calcular el rendimiento.

Los lotes de ST provenientes de ambos pretratamientos se sometieron a extracción acuosa de acuerdo con la metodología reportada por Zavala-Corrales *et al.* (2020). Para ello, el ST se mezcló con agua HPLC a 5 °C en una relación 1:10 p/v en vasos de precipitados de 1 L. Las mezclas se agitaron constantemente durante 3 h a 5 ± 1 °C, colocando los vasos sobre placas de agitación magnética en el interior de un refrigerador.

Después de la extracción acuosa, cada mezcla se filtró a través de tela de organza para separar los sólidos gruesos. Los residuos en la tela de organza se secaron a 40 °C y se pesaron para calcular rendimientos. Los filtrados se centrifugaron a 3,000×*g*. Los sobrenadantes de la centrifugación se liofilizaron, se identificaron como EAST y se pesaron para calcular rendimientos.

Se calculó el gasto de energía en la etapa de secado, multiplicando la potencia del horno de convección (1.4 kW) por la duración del proceso (18 h). El horno se cargó a su máxima capacidad volumétrica, admitiendo 1 kg de ST húmedo distribuido en la superficie de las parrillas del horno. El gasto energético en el paso de la molienda parcial se calculó multiplicando la potencia del procesador de alimentos (0.15 kW) por la suma del tiempo de los tres ciclos de molido (0.017 h). Con la relación sólido a líquido (1:10), en la etapa de lavado, se calculó el consumo de agua por kg de ST.

En trabajos anteriores se observó que, después de la extracción acuosa, los filtrados (antes de centrifugar) contienen componentes que precipitan al mantener el sistema toda la noche a 5±1 °C (datos no publicados). Para recuperar y caracterizar estos precipitados, se realizó una extracción acuosa de ST posterior a la aplicación del pretratamiento 1. Después de filtrar en tela de organza y antes de centrifugar, los filtrados se mantuvieron 24 h a 5±1 °C para inducir la precipitación de los componentes menos solubles. Posteriormente se recuperaron estos precipitados mediante centrifugación a 3,000×*g* y liofilización. Se tomaron imágenes estereoscópicas de los mismos con un microscopio estereoscópico Leica S9i (Leica Microsystems, CH) y se midió su color en la escala *Lab* con un colorímetro Minolta Hunter CR 300 (JPN).

Los contenidos de proteínas totales, cenizas y lípidos, se cuantificaron mediante los métodos 960.52, 945.05 y 920.39 de la AOAC (2005), respectivamente. La proteína soluble se estimó mediante el método de Bradford (1976).

Las determinaciones de almidón se realizaron con el kit Starch Assay 20 (Sigma, Cat. SA20). Mediante una serie de reacciones enzimáticas, la glucosa liberada del almidón se fosforiló y se oxidó hasta 6-fosfogluconato en presencia de NAD. Una cantidad equimolar de este último se redujo a NADH al tiempo que aumentó la absorbancia a 340 nm, la cual es proporcional a la concentración de glucosa. El cálculo para la cuantificación del almidón se realizó de acuerdo con las instrucciones en el kit.

El contenido de ácido fítico se determinó mediante la liberación del fósforo (P) del ácido fítico por la enzima fitasa, en un primer paso. Posteriormente, el fósforo liberado vía enzimática se hizo reaccionar con molibdato de amonio para generar un color azul. Se leyó la absorbancia a 650 nm y la concentración de fósforo [P] se calculó con la ecuación de regresión de una curva estándar de P. Para cuantificar el ácido fítico se utilizó la relación [P]/0.282. Los reactivos y la metodología fueron proporcionados en el kit K-PHYT 05/17 (Megazyme, IRL).

Todas las determinaciones se hicieron por triplicado. Se reportó la media y la desviación estándar de cada uno de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestra el porcentaje de ST residual en cada etapa de los dos procesos de obtención de EAST. Este porcentaje se calculó con base en el peso del ST que entró a cada una de las etapas. También se muestra el rendimiento global de EAST, con base en el peso de ST seco antes de la extracción acuosa, para cada pretratamiento. El menor porcentaje de ST retenido en la malla #40 en el cernido para el pretratamiento 2 se explica por el efecto de la molienda parcial, ya que se desprendieron partículas finas de harina y hubo una reducción de tamaño de algunas partículas del ST, facilitando su paso por la malla. Para el paso de lavado y secado no hay comparación. El bajo porcentaje de ST residual, posterior a la extracción acuosa para el pretratamiento 2 indica una mayor extracción de componentes solubles del ST y que la molienda parcial es menos efectiva que el lavado para la remoción de partículas de harina. Esto último también se refleja en un mayor rendimiento del EAST obtenido en el pretratamiento 2.

Tabla 1: Rendimientos en peso (%) durante el proceso de obtención de extractos acuosos de salvado de trigo, sometido a dos tipos de tratamiento previo a la extracción acuosa.

Paso del proceso	Pre-tratamiento 1	Pre-tratamiento 2
Cernido	95.8 ± 0.30	84.5 ± 0.67
Lavado + secado a 40 °C	82.2 ± 0.89	--
Extracción acuosa	80.5 ± 1.47	66.7 ± 0.48
Liofilizado (EAST)	8.52 ± 0.19	10.9 ± 0.35

Respecto al consumo de agua y energía, se calculó que en las etapas de lavado y secado del pretratamiento 1, por cada kg de ST se consumen 10 L de agua y 25.2 kWh de energía, respectivamente. Por otro lado, en la etapa de molienda parcial del pretratamiento 2 se calculó un consumo de energía de 0.0102 kWh por kg de ST. Es decir, se consume 2,470 veces menos energía en el pretratamiento 2, sin ningún consumo de agua, lo cual permite inferir un ahorro significativo a una mayor escala del proceso. Sin embargo, en el análisis global también hay que considerar los resultados de la cuantificación de almidón, proteína y ácido fólico, los cuales se observan en la Tabla 2.

Al comparar los contenidos de proteína en cada paso, se percibe que la extracción de estas macromoléculas no es total, debido a que la extracción es acuosa y no todas las proteínas del ST son solubles en agua, además de que algunas se encuentran formando complejos con la fibra insoluble (Kaur *et al.*, 2019). Aun así, se obtiene un EAST con un contenido de proteínas de entre 12 y 13%. Este EAST es utilizado para ensayos de producción de nanopartículas y biominerale, por lo que es susceptible de valor agregado. El EAST del pretratamiento 2 tuvo mayor contenido de proteínas y almidón que el EAST del pretratamiento 1, debido a que en las hojuelas de ST sin lavar había más partículas de harina, las cuales fueron arrastradas por el agua.

Tabla 2: Contenidos de proteína, almidón y ácido fólico de los residuos de ST durante la extracción acuosa.

Etapa	Proteína (g/100 g)		Almidón (g/100 g)		Ácido fólico (g/100 g)	
	Pretrat. 1	Pretrat. 2	Pretrat. 1	Pretrat. 2	Pretrat. 1	Pretrat. 2
Cernido	16.9±0.32	16.3 ± 0.26	18.0 ± 0.40	16 ± 0.75	2.77 ± 0.23	6.44 ± 0.54
Lavado + secado a 40 °C	13.9 ± 0.88	--	15.5 ± 1.10	--	1.89 ± 0.64	--
Extracción acuosa	15.9± 0.45	14.4 ± 0.47	1.29 ± 0.13	1.13 ± 0.24	0.25 ± 0.03	0.87 ± 0.05
Liofilizado (EAST)	11.6±0.65	12.8 ± 0.49	2.20 ± 0.56	4.10 ± 0.27	4.81 ± 0.40	7.48 ± 0.63

Respecto al contenido de almidón, este disminuyó drásticamente durante todo el proceso. Podría esperarse que este almidón fuera recuperado en los EAST, pero no es así dado la cantidad tan pequeña en los mismos. La razón es que una gran proporción del almidón se extrajo con el agua y precipitó durante la centrifugación de los extractos acuosos no liofilizados. Esto se evidenció al analizar el precipitado, como se describe a continuación.

En el precipitado de la extracción acuosa se distinguieron tres capas, las cuales se muestran en la imagen estereoscópica del precipitado liofilizado de la Figura 2. Una, color blanquecino (L=82, a=-2, b=18), la de mayor densidad (Figura 2b); otra, de color paja oscuro (L=76, a=16, b=35), de consistencia pegajosa antes de la liofilización y menos densa que la anterior, vista al centro de la Figura 2a y Figura 2c; la tercera capa fue de color paja claro (L=75, a=4, b=38), menos densa y adherida a la superficie de las otras dos (Figura 2d). Después de liofilizar el precipitado y separar físicamente las capas, con el mayor cuidado posible, se pesó cada una de las mismas y se calcularon sus respectivas proporciones. También se analizó el contenido de proteínas, almidón y ácido fólico en cada una de las capas, todo lo cual se reporta en la Tabla 3. Cabe mencionar que fue imposible una completa separación de las capas, por lo que en cada una hay trazas de las otras dos.

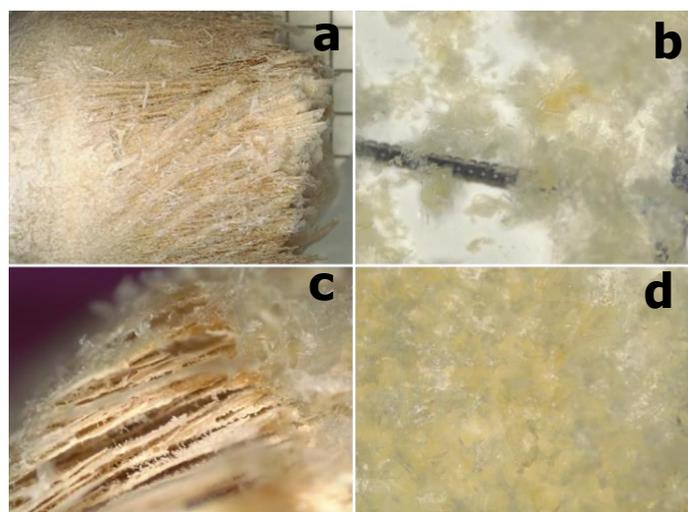


Fig. 2: Imágenes estereoscópicas de a) precipitado liofilizado obtenido posterior a la extracción acuosa de salvado de trigo; b) capa más densa; c) capa intermedia (al centro); d) capa menos densa.

La capa más densa del precipitado fue la menos abundante y estuvo constituida mayormente por almidón, con menos de 1% de proteínas. En orden ascendente de abundancia se encontró la capa menos densa, cuyo contenido de almidón fue casi la mitad del correspondiente al de la capa más densa, más una cantidad moderada de proteínas. La capa intermedia del precipitado fue la más abundante, con casi un 86% del total. Esta capa fue rica en almidón y con casi 13% de proteína. El contenido de ácido fólico en todas las capas fue menor al 1%, corroborando que la mayor parte de este componente se recuperó en los EAST, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 3: Contenidos de proteína, almidón y ácido fólico de los precipitados post centrifugación.

Precipitados	% en peso	Proteína (g/100 g)	Almidón (g/100 g)	Ácido fólico (g/100 g)
pp más denso	5.70 ± 0.2	0.70 ± 0.02	84.8 ± 0.50	0.10 ± 0.06
pp menos denso	8.30 ± 0.4	6.71 ± 0.30	45.0 ± 0.96	0.96 ± 0.10
pp intermedio	85.5 ± 1.3	12.8 ± 0.25	71.9 ± 1.20	0.25 ± 0.04

El resto de la composición del precipitado son minerales (2.35%), lípidos (2.63%) y otros componentes aún no identificados. Este precipitado representa una proporción importante recuperada después de la extracción acuosa del ST. Su contenido de almidón y proteínas, además de minerales y lípidos, lo hacen susceptible de ser utilizado como suplemento nutricional, representando una forma de potencial valor agregado para el ST.

Los presentes resultados sugieren que mediante extracción acuosa es posible remover, de forma fraccionada, al menos 3 componentes valiosos del ST, los cuales pueden ser recuperados posteriormente para su utilización.

CONCLUSIONES

La sustitución de las etapas de lavado y secado por una molienda parcial, durante el proceso de obtención de extractos acuosos de salvado de trigo resulta en un ahorro de agua y energía, al tiempo que proporciona un mayor rendimiento en peso de extractos, no afecta significativamente la concentración de proteínas o almidón en los mismos y se recupera una mayor cantidad de ácido fólico. Posterior a la extracción acuosa, tanto en el proceso convencional como en el alternativo se recupera un precipitado rico en almidón.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del proyecto de Ciencia Básica A1-S-40197, financiado por el Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) México.

REFERENCIAS

- Alkandari, S., Bhatti, M.E., Aldughpassi, A., Al-Hassawi, F., Al-Foudari, M. & Sidhu, J.S. (2021). Development of functional foods using psyllium husk and wheat bran fractions: Phytic acid contents. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28 (6), 3602-3606. doi: 10.1016/j.sjbs.2021.03.037
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists. 28th Ed. Washington, USA.
- Apprich, S., Tirpanalan, O., Hell, J., Reisinger, M., Böhmendorfer, S., Siebenhandl-Ehn, S., *et al.* (2014). Wheat bran-based biorefinery 2: Valorization of products. *LWT- Food Science and Technology*, 52, 222-231.
- Atuonwu, J., Tassou, S. & Foster, T. (2019). *Development of Food Structure via Sustainable Processing Systems*. In *Handbook of Food Structure Development*, F. Spyropoulos, A. Lazidis, and I. Norton (Eds), The Royal Society of Chemistry, chapter 16, pp. 403-421.
- Balandrán-Quintana, R.R., Mercado-Ruiz, J.N. & Mendoza-Wilson, A.M. (2015). Wheat Bran Proteins: A Review of Their Uses and Potential. *Food Reviews International*, 31 (3), 279-293, DOI: 10.1080/87559129.2015.1015137
- Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, 72, 248-254.
- Chaquilla-Quilca, G., Balandrán-Quintana, R.R., Azamar-Barríos, J.A., Ramos-Clamont Montfort, G., Mendoza-Wilson, A.M., Mercado-Ruiz, J.N., *et al.* (2016). Synthesis of tubular nanostructures from wheat bran albumins during proteolysis with V8 protease in the presence of calcium ions. *Food Chemistry*, 200,16-23.
- FAOSTAT. (2023). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Glaser, S.J., Al-Rudainy, B., Hatti-Kaul, R. & Galbe, M. (2023). Wheat bran fractionation: Effect of steam explosion and hydrotropic extraction conditions on the recovery of sugars and lignin. *Industrial Crops and Products*, 195, 116405. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116405>.
- Gupta, R.K., Gangoliya, S.S. & Singh, N.K. (2015). Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. *Journal of Food Science and Technology*, 52 (2), 676-84. doi: 10.1007/s13197-013-0978-y
- Janssen, F., Courtin, C.M. & Wouters, A.G.B. (2023). Aqueous phase extractable protein of wheat bran and germ for the production of liquid and semi-solid foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 19, 1-19. doi: 10.1080/10408398.2023.2214615.
- Kaur, A., Yadav, M.P., Singh, B., Bhinder, S., Simon, S. & Singh, N. (2019). Isolation and characterization of arabinoxylans from wheat bran and study of their contribution to wheat flour dough rheology. *Carbohydrate Polymers*, 221, 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.06.002>.
- Li, Y., Wang, H., Wang, L., Qiu, J., Li, Z. & Wang, L. (2023). Milling of wheat bran: Influence on digestibility, hydrolysis and nutritional properties of bran protein during in vitro digestion. *Food Chemistry*, 40415, 134559. 10.1016/j.foodchem.2022.134559

Luna-Valdez, J.G., Balandrán-Quintana, R.R., Azamar-Barrios, J.A., Mendoza-Wilson, A.M. & Ramos-Clamont Montfort, G. (2021). A spectroscopic approach to determine the formation mechanism of biopolymer particles from wheat bran proteins. *Journal of Molecular Structure*, 1224, art. no. 129194 DOI: 10.1016/j.molstruc.2020.129194

Mallin, M.A. (2000). Impacts of industrial animal production on rivers and estuaries: Animal-waste lagoons and sprayfields near aquatic environments may significantly degrade water quality and endanger health. *American Scientist*, 88 (1), 26-37. <http://www.jstor.org/stable/27857960>

Merone, D., Colucci, D., Fissore, D., Sanjuan, N. & Carcel, J.A. (2020). Energy and environmental analysis of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying of food. *Journal of Food Engineering*, 283, 110031. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110031>.

Venkataraman, S. & Vaidyanathan, V.K. (2023), Dephytinization of wheat and rice bran by cross-linked enzyme aggregates of *Mucor indicus* phytase: A viable prospect for food and feed industries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103, 1935-1945. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12345>

Zavala-Corrales, J.L., Balandrán-Quintana, R.R., Azamar-Barrios, J.A., Mendoza-Wilson, A.M., Hurtado-Solórzano, P.G. & Pompa-Redondo, J.S. (2020). Wheat bran extracts as biomineralization scaffolds: An exploratory study leading to aqueous solution synthesis of spheroidal brushite particles. *Food and Bioproducts Processing*, 121, 238–249.