Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Retos para una valorización sostenible del salvado de trigo: Lo bueno supera a lo malo y lo feo

Challenges for sustainable valorization of wheat bran: The good outweighs the bad and the ugly

Balandrán-Quintana, R.R., Mendoza-Wilson, A.M.

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal. Calle Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, Ejido La Victoria, 83304, Hermosillo, Sonora, México.
rbalandran@ciad.mx; mwilson@ciad.mx

Innovación tecnológica. Alternativas sostenibles para el uso de salvado de trigo.

Área de aplicación industrial. Industria alimentaria, farmacéutica y biomédica.

Recibido: 14 septiembre 2021
Aceptado: 18 febrero 2022

Abstract

Wheat bran is an agro-industrial by-product with a dynamic world market, which is mainly used for animal feed, despite being an excellent source of nutrients and bioactive compounds beneficial to human health. Some factors that determine the low consumption of bran by humans are also the cause of environmental problems due to its extensive use in animal feed. The accumulated knowledge and the demands of modern life led to a trend towards the valorization of wheat bran components for applications in different fields of industry, in a context of sustainability. The manuscript presents a review of the advantages and disadvantages of the use of wheat bran. In a narrative way, the most important components are discussed, in relation to their effects on health and with technological and environmental aspects. The objective is to offer evidence that the valorization of wheat bran is a current trend, as well as to distinguish areas of opportunity in each case, to stimulate interest in carrying out further research in this regard. When comparing the benefits and disadvantages, it is inferred that the latter should not be a counterweight to the promotion of the use of bran, since scientific evidence indicates that they can be solved to make bran a highly sustainable product. The review finds a growing interest of the population in gastrointestinal health, which is projected in a greater demand for foods with wheat bran. The scientific community and industry must increase innovation efforts to meet this demand.

Keywords: sustainable agroindustrial byproducts, high-value bio-based products, valorization of cereal byproducts, wheat bran fiber.

Resumen

El salvado de trigo es un subproducto agroindustrial con un mercado mundial dinámico, que se destina principalmente a la alimentación animal, pese a ser excelente fuente de nutrientes y compuestos bioactivos beneficiosos para la salud humana. Algunos factores que determinan el bajo consumo de salvado por los humanos también son causa de problemas ambientales debido a su uso extensivo en la alimentación animal. El conocimiento acumulado y las exigencias de la vida moderna condujeron a una tendencia hacia la valorización de los componentes del salvado de trigo para aplicaciones en diferentes campos de la industria, en un contexto de sustentabilidad. El manuscrito presenta una revisión sobre las ventajas y los inconvenientes del uso de salvado de trigo. De una forma narrativa se discuten los componentes más importantes, en relación con sus efectos a la salud y con aspectos tecnológicos y ambientales. El objetivo es ofrecer evidencia de que la valorización del salvado de trigo es una tendencia actual, así como distinguir áreas de oportunidad en cada caso, para estimular el interés por realizar mayor investigación al respecto. Al comparar los beneficios y las desventajas, se infiere que estas últimas no debieran ser un contrapeso para la promoción del uso del salvado, toda vez que la evidencia científica indica que pueden ser solventadas para hacer del salvado un producto altamente sostenible. La revisión encuentra un creciente interés de la población por la salud gastrointestinal, lo cual se proyecta en una mayor demanda por alimentos con salvado de trigo. La comunidad científica y la industria deben incrementar esfuerzos de innovación, para atender dicha demanda.

Palabras clave: Subproductos agroindustriales sostenibles, productos de alto valor de base biológica, valorización de subproductos de cereales, fibra de salvado de trigo.

1. Introducción

El salvado de trigo, un subproducto agroindustrial, es fuente de fibra dietaria y de una variedad de compuestos bioactivos, además de otros componentes de alto valor. El consumo humano de salvado de trigo está limitado por ciertos factores, por lo que se destina principalmente a la alimentación animal; sin embargo, representa una carga para el medio ambiente, por lo que es objeto de estudio en el contexto de la sostenibilidad. El objetivo de la presente revisión es presentar información objetiva respecto a la valorización del salvado de trigo, en el ámbito de la ciencia y tecnología de alimentos, así como en otros campos relacionados con la industria agroalimentaria. La información destaca los beneficios del salvado de trigo, pero también los inconvenientes, de tal forma que se distinguen diferentes áreas de oportunidad en cada caso, para estimular la innovación.

La metodología consistió en realizar búsquedas en bases de datos, para encontrar publicaciones relevantes sobre el tema de la valorización del salvado de trigo en el periodo de 1960 a 2021. Para la búsqueda de artículos científicos se utilizó la plataforma *Scopus*, con una estrategia que consistió en buscar en los campos *Título de Artículo*, *Resumen* y *Palabras Clave*, la expresión “wheat bran”, además de “wheat bran” seguida de la palabra AND y esta última seguida de cada una de las palabras o expresiones mencionadas en la Tabla 1. Para recuperar datos sobre producción, comercialización y usos de salvado de trigo, se utilizó el motor de búsqueda *Google*, bajo el criterio de que la información proviniese de fuentes oficiales o privadas, estas últimas de reconocido prestigio. De la información recuperada, se seleccionaron 102 referencias, de acuerdo con los criterios de relevancia y de actualidad, es decir, más del 80% publicadas entre 2015

y 2021 y cuya información estuviese relacionada con la industria agroalimentaria, el medio ambiente y/o la salud.

Los resultados de la revisión se presentan de forma narrativa y se dan evidencias de cómo la valorización del salvado de trigo es una tendencia actual, tanto en ciencia y tecnología de alimentos como en otros campos que inciden indirectamente en la industria agroalimentaria. La información destaca los beneficios del salvado de trigo, pero también los inconvenientes, de tal forma que se distinguen diferentes áreas de oportunidad en cada caso. Al comparar las ventajas y desventajas del salvado de trigo con respecto a sus usos actuales y potenciales, las primeras tienen mayor peso, por lo que se concluyó que es pertinente promover la innovación.

2. La industria agroalimentaria en el contexto de la sostenibilidad

En la sesión plenaria de la cumbre de la Alimentación de las Naciones Unidas, celebrada en julio de 2021, el director de la FAO enfatizó que "la ciencia, la tecnología y la innovación son esenciales para acelerar la transformación de los sistemas agroalimentarios y combatir el hambre y la malnutrición" [1]. Dicha transformación pretende responder al desafío global de producir alimentos nutritivos de forma sostenible. La FAO define a un sistema alimentario sostenible como "aquel que brinda seguridad alimentaria y nutrición para todos de tal manera que no se comprometan las bases económicas, sociales y ambientales para generar seguridad alimentaria y nutrición para las generaciones futuras. Esto significa que es rentable en todo momento, asegura la sostenibilidad económica, tiene amplios beneficios para la sociedad, asegura la sostenibilidad social y tiene un impacto positivo o neutral en el medio ambiente y en los recursos naturales, salvaguardando la sostenibilidad de estos" [2].

Por otro lado, a nivel global se conoce que entre 24 y 56% de la energía consumida por los seres humanos proviene de alimentos ultraprocesados [3], así como la asociación entre el consumo de estos y un mayor riesgo de sobrepeso y obesidad, además de otros problemas de salud resultantes [4; 5; 6; 7]. Si a esto se le suman los problemas ambientales existentes en el planeta, se reitera la necesidad por la producción de alimentos sostenibles, donde la comunidad académica y la industria desempeñan un papel importante. Tal es el caso de la disposición final de los subproductos agroindustriales, debido a los problemas económicos y ambientales que ello representa [8; 9]. En el caso del procesamiento de cereales, algunos subproductos como el salvado de trigo se destinan principalmente al consumo animal [10]. Sin embargo, su utilización a gran escala resulta en un fuerte y negativo impacto ambiental ya que algunos de los componentes químicos contaminan el agua, al no ser asimilables por los animales (Figura 1). Además, se desperdician diversos compuestos bioactivos con beneficios comprobados para la salud humana y con potencial para ser utilizados en procesos industriales sostenibles.

En este sentido, la tendencia actual es valorizar los residuos agroindustriales a partir de la biorrefinación. La valorización se define como un proceso cuyo objetivo es dar alguna utilidad a los residuos, mientras que la biorrefinación consiste en fraccionar la biomasa en componentes intermedios, los cuales se procesan posteriormente a través de métodos sostenibles para la obtención de una diversidad de productos de base biológica [11].

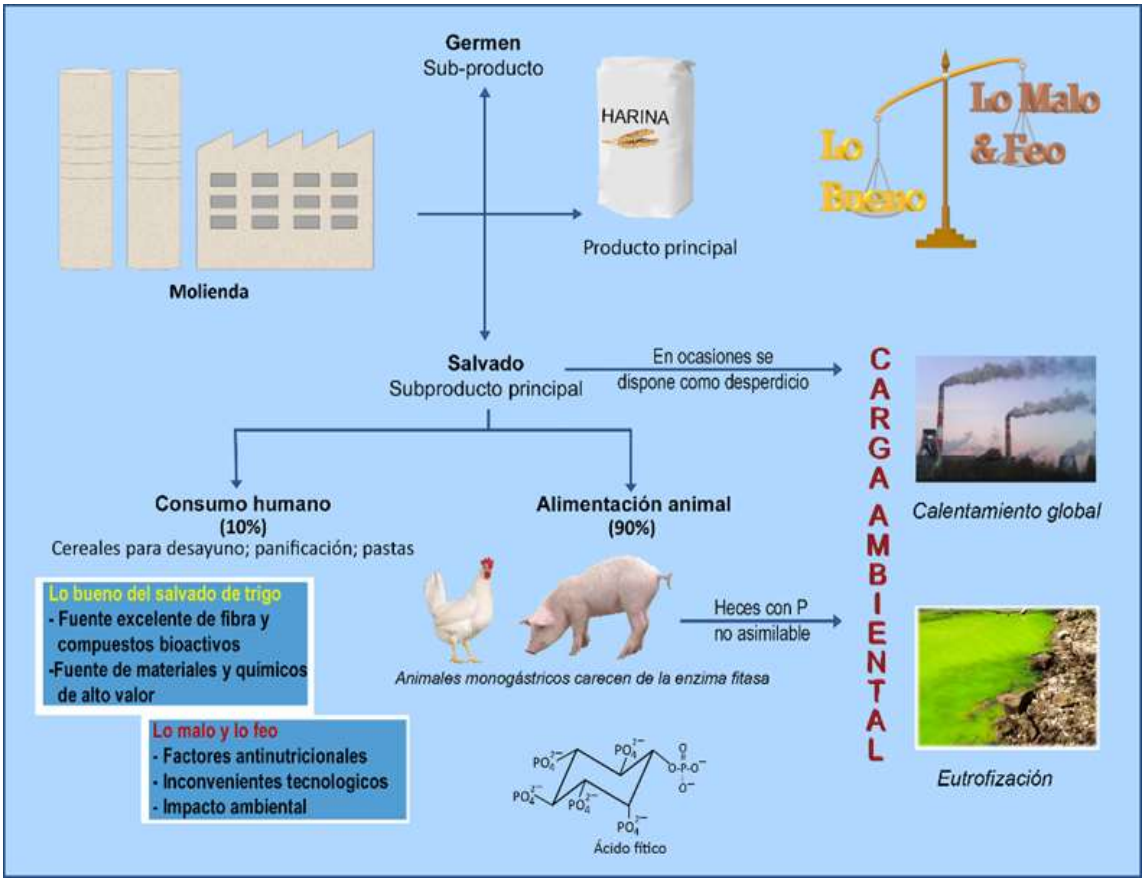


Figura 1. Resumen de la obtención, usos actuales y beneficios del salvado de trigo, así como de los factores que limitan su consumo por los seres humanos y el impacto ambiental derivado de un uso extensivo en la alimentación animal [Creación de los autores. Crédito a la foto de eutrofización: Alexandr Trubetskoy; licencia: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Potomac_green_water.JPG].

3. Definición de salvado de trigo

El salvado de trigo es el principal subproducto de la molienda a la que se somete el grano de trigo y constituye la cubierta de este, la cual se separa en forma de hojuelas durante el triturado. La estructura del salvado consiste en multicapas fuertemente adheridas, constituidas principalmente por células muertas. La capa más interna es la aleurona, que, aunque anatómicamente pertenece al endospermo, durante la molienda queda adherida a las partículas de salvado. Los mayores componentes del salvado de trigo son la fibra soluble e insoluble (45.1 g/100 g), proteína (14.9 g/100 g), almidón (13.4 g/100 g), minerales (6.2 g/100 g) y lípidos (4.7 g/100 g); además, es una fuente importante de compuestos bioactivos [12].

4. Lo bueno del salvado de trigo

4.1. Opción atractiva de valor agregado

El trigo es el segundo cereal más importante del mundo en cuanto a volumen de producción, del cual en 2019 se produjeron 766 millones de toneladas [13]. La producción global anual de salvado de trigo es de aproximadamente 126 millones de toneladas, dado que aproximadamente 66% del trigo producido se destina a consumo humano [14], asumiendo que todo se procesa en la molienda y que, por cada tonelada, se obtienen 250 kg de salvado como subproducto [15]. Aunque el dato sólo es estimado y corresponde a un año determinado, el punto importante es que la producción de salvado de trigo a nivel

mundial es significativa, pues corresponde aproximadamente al 16% del peso del trigo producido. El mercado mundial del salvado de trigo es dinámico, en 2020 tuvo un valor de exportación de 678.39 millones de dólares (USA), mientras que el valor de las importaciones fue 659.49 millones de dólares (USA); el mayor exportador es Alemania y China el principal importador [16]. En este intercambio mundial de salvado trigo, México ocupó el lugar número 100 en las exportaciones, con un valor de 13,280 dólares (USA), mientras que en las importaciones se posicionó en el lugar 51, con un valor de 1.9 millones de dólares (USA) [17].

El 90% del salvado de trigo que se produce globalmente se destina a la alimentación animal y el 10% restante se emplea como ingrediente en la industria alimentaria para la elaboración de productos de la panificación, galletas, cereales para desayuno y pastas [18; 19], así como para la preparación de productos caseros y platillos saludables. El salvado de trigo es relativamente barato, aunque su precio tiene variaciones durante el año, por ejemplo, en julio de 2021 su precio en el mercado internacional fue de 0.12−0.27 dólares por kg [20]. Sin embargo, cuando se vende al menudeo para consumo humano su precio aumenta al menos 10 veces, lo cual se puede constatar al consultar los precios de diferentes proveedores, tanto en supermercados como en ventas *online*. Lo anterior da cuenta del alto potencial del salvado de trigo en cuanto a su valor agregado.

4.2.El salvado de trigo como una de las mejores fuentes de fibra dietaria

El salvado de trigo contiene 45% en peso de fibra dietaria total, aproximadamente, la cual está constituida principalmente por arabinoxilanos (60%) y por celulosa (30%) [11]. Los beneficios para la salud humana del consumo regular de fibra se han documentado ampliamente [21; 22] y el salvado de trigo está reconocido entre las mejores fuentes de fibra dietaria [23]. Tiene efectos en la prevención de enfermedades como el cáncer de colon, la enfermedad cardiovascular, obesidad y enfermedades gastrointestinales [18]. Además, combate el estreñimiento crónico [24] y actúa como prebiótico, al regular la flora intestinal [25].

El salvado de trigo ha sido mayormente estudiado con relación a su contenido de fibra. Mediante una búsqueda en la plataforma *Scopus* se recuperaron 1795 documentos que contienen en el título la expresión “wheat bran” durante el período 1960− 2021. En la Figura 2 se muestra la tendencia creciente que refleja un interés por investigar el salvado de trigo. Si a la búsqueda se le incluyen palabras clave, como las que se muestran en la Tabla 1, el número de documentos recuperados relacionados con la fibra exceden sobradamente a los demás. Una observación importante, es que los términos “sustainability”, “valorization” o “biocomposite” aparecen con poca frecuencia en los títulos. Es cierto que estos términos son relativamente nuevos, lo que explica que no se hayan utilizado en periodos pasados, o que en la época actual aparezcan más en las palabras clave de las publicaciones. Sin embargo, la sugerencia es dar a éstos mayor difusión al integrarlos en el desarrollo sostenible a través del título, o como palabras clave, de las publicaciones, ya que este es el principal atractivo para los lectores. Como sea, la información obtenida y divulgada ha despertado el interés de la gente por el consumo de salvado de trigo y la industria de alimentos ha respondido favorablemente. Esto último lo evidencian las estadísticas respecto al aumento en la cantidad de alimentos que contienen salvado de trigo, cuyo número se disparó casi 15 veces más entre 2001 y 2011 [15]. Si este comportamiento se extrapola al año 2025, habrá un aumento de hasta 1,800 productos

con salvado de trigo. Esto es sólo en lo que concierne al consumo directo de salvado o a su incorporación en alimentos procesados, pero su uso para la obtención de productos de alto valor, que impactan indirectamente a la tecnología de alimentos, es otro tema igualmente interesante [8].

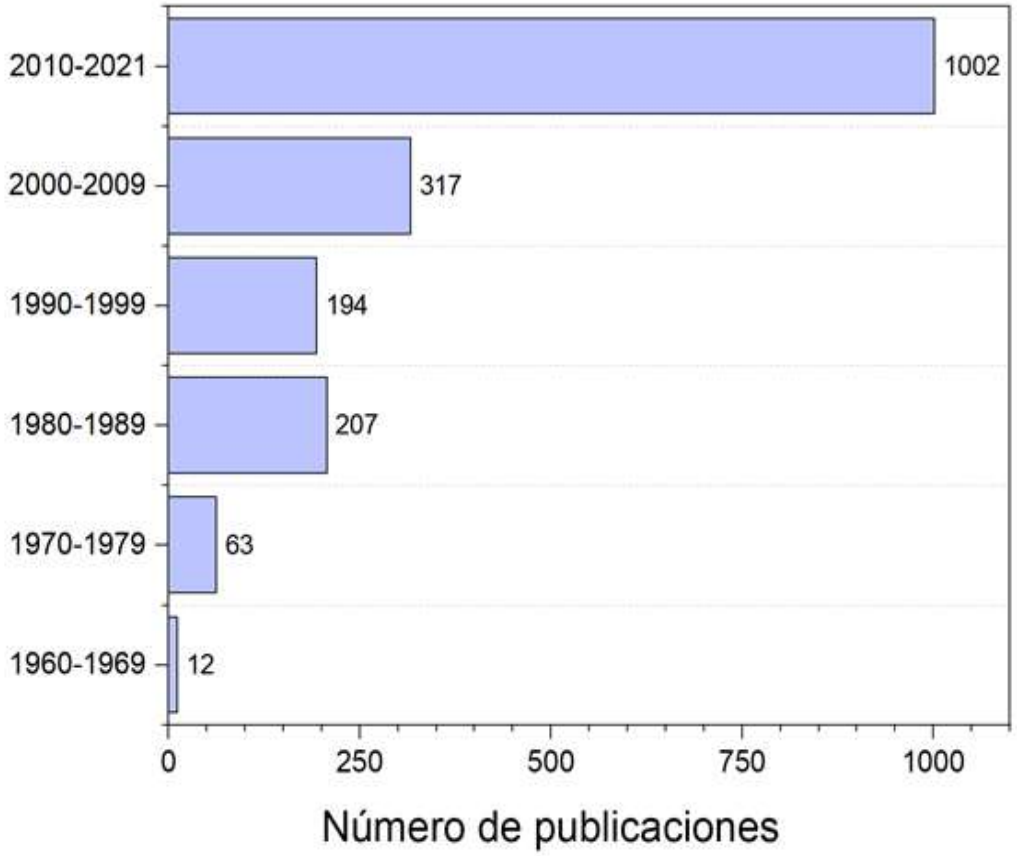


Figura 2. Documentos recuperados por década en el período 1960−2021, mediante la búsqueda de la expresión "wheat bran" en el título de las publicaciones [Fuente: base de datos *Scopus*. http://www.scopus.com/. Consultado el 16 de julio de 2021].

Con base en los principios del desarrollo sostenible, en el mundo existe interés por la bioeconomía circular, que incluye el incorporar los desechos agroindustriales para fabricar nuevos productos [26]. En este contexto, algunos usos tecnológicos de la fibra del salvado consisten en la producción de enzimas, fabricación de biocompósitos, biocombustibles y otros productos biotecnológicos. Los residuos de los cereales, entre los que sobresale el salvado de trigo, son los sustratos más utilizados para investigar la producción de enzimas mediante fermentación en estado sólido. Este es un proceso sostenible y rentable, ya que las enzimas tienen un alto valor [26; 27; 28]. Los componentes de la fibra del salvado de trigo también sirven como fuente de azúcares fermentables para la producción de bioetanol [29], así como para la elaboración de acarreadores de probióticos [30] y de surfactantes no iónicos [31].

Tabla 1. Documentos recuperados de la base de datos *Scopus*, al añadir diferentes palabras clave a la expresión "wheat bran" en la búsqueda.

Palabras clave adicionales a *"wheat bran"*	Periodo [a]	Número de documentos
"nutraceutical"	2016	1
"sustainability"	2019	1
"biocomposite" or "nanocomposite"	2014-2021	4
"nanoparticles"	2015-2017	4
"diabetes"	1984-2021	4
"valorization"	2014-2021	7
"probiotic"	2015-2021	8
"biorefinery"	2009-2019	11
"ethanol"	2005-2020	11
"health"	2010-2021	14
"bioethanol" or "biodiesel" or "biofuel"	2015-2021	15
"functional"	2003-2021	24
"cellulose"	1972-2021	27
"cancer"	1990-2019	27
"phenolics"	2005-2021	39
"proteins"	1970-2021	57
"arabinoxylans"	1996-2021	75
"antioxidants"	1992-2021	85
"fiber"	1975-2021	183

[a] Solo se muestran los períodos para los cuales se recuperaron documentos; las palabras clave explícitas a la fibra se indican en negritas [Fuente: *Scopus*, http://www.scopus.com/, consultado el 16 de julio de 2021].

Por otro lado, la necesidad de remplazar las fibras derivadas de residuos fósiles por las de origen natural, ha puesto en la mira a los biomateriales, entre los cuales el salvado de trigo es prometedor [32]. Se han contrastado los impactos ambientales resultantes de fabricar biocómpositos con fibra de salvado de trigo contra las fibras derivadas del petróleo; el balance es favorable para el salvado de trigo en algunos de ellos [19]. No obstante, se reconoce que, para ser un proceso completamente sostenible, deberán atenderse otras cuestiones relacionadas con las prácticas agrícolas, el uso de energía y químicos para la extracción de la fibra, así como la biodegradabilidad de los biocompósitos [19]. En este campo existen, actualmente, muchas áreas de oportunidad para realizar investigación.

Otro uso propuesto para el salvado de trigo, con base en la fibra, es la remoción de metales

pesados presentes en agua [33]. Se ha encontrado que el salvado de trigo actúa como un adsorbente natural de cationes de metales pesados, pues remueve más de 82% de cromo, mercurio, plomo, cadmio y cobre, presentes en soluciones acuosas [34]. Interesantemente, el salvado de trigo tiene mayor especificidad por cationes de metales pesados, en comparación con otros cationes como sodio y potasio [34], además de que la adsorción es reversible, lo que permite la recuperación de los metales pesados [35]. El mecanismo de adsorción de cadmio y plomo está relacionado, aparentemente, con los grupos carboxilo de las sustancias pécticas presentes en el salvado [36].

4.3.Fuente de minerales esenciales

En el salvado se concentra casi la mitad de los minerales y elementos traza que contiene el grano de trigo [18]. Los más abundantes son potasio (K), fósforo (P), magnesio (Mg), calcio (Ca), hierro (Fe) y manganeso (Mn) [12]. En las capas externas existe mayor concentración de Mn, Si, Ca y Sr, mientras que el K, Mg, P, Fe, Zn y Cu predominan en la aleurona [37]. La concentración de P se correlaciona con la de Mg, Fe, Zn y Cu, por lo que se ha sugerido que estos elementos se encuentran en forma de fitatos, es decir formando complejos con moléculas de ácido fítico [37]. La biodisponibilidad de los minerales acomplejados con ácido fítico es baja, por lo que el ácido fítico es considerado un factor antinutricional, tema que se abordará en una sección posterior.

Además de que el salvado es una fuente nutricional de minerales, la mayor parte de éstos (las cenizas), se han estudiado como componentes de catalizadores para la producción de biodiesel a partir de desechos de aceite para cocinar, con buenos resultados [38]. Por otro lado, algunos elementos minerales presentes en el salvado pueden utilizarse para producir, a su vez, minerales más complejos con aplicaciones industriales, por ejemplo, el fosfato de calcio dihidratado (brushita). La brushita es una biocerámica utilizada en la industria biomédica, como componente abrasivo en pastas dentales, aditivo en alimentos balanceados, así como en el tratamiento de aguas, entre muchas otras aplicaciones [39]. La forma esférica de los fosfatos de calcio es particularmente interesante para la industria y no es fácil su producción [40]. No obstante, mediante biomineralización *in vitro*, con el empleo de extractos acuosos de salvado de trigo, se ha logrado precipitar brushita esférica con estrecha distribución de tamaños, aprovechando el fósforo pre-existente, en forma fosfato [41]. Se cree que otros de los componentes de los extractos actuarían como andamio para dirigir la biomineralización, lo cual abre nuevas oportunidades de investigación y de revalorización del salvado de trigo [41].

4.4.Fuente de compuestos fenólicos

El salvado de trigo es uno de los subproductos agroindustriales con mayor capacidad antioxidante, debido a su contenido de compuestos fenólicos, principalmente [42]. Estos pueden estar en forma libre, como los flavonoides (Figura 3A), o en forma enlazada, como el ácido ferúlico [43] (Figura 3B). Este último se encuentra esterificado a residuos del azúcar arabinosa de la cadena de arabinoxilano, el componente mayoritario de la fibra soluble [44] (Figura 3C). La bioactividad de los compuestos fenólicos, en relación con la salud, es sobradamente reconocida y se debe a sus capacidades antioxidante, de captura de radicales libres, antiinflamatoria, anticáncer, entre muchas otras [45]. El ácido ferúlico, además de ser un poderoso antioxidante y poseer propiedades antiinflamatorias se reconoce por su función terapeútica al inhibir el decaimiento cognitivo de pacientes con demencia moderada [46]. El ácido ferúlico puede ser liberado de la fibra,

con efectividad, mediante un complejo multienzimático y, posteriormente, recuperado [47]. Una de las grandes tendencias en lo que a usos de salvado de trigo se refiere, es la elaboración de alimentos nutracéuticos, debido a que es una buena fuente de compuestos fenólicos [48].

4.5.Fuente de alquilresorcinoles

Los alquilresorcinoles son un grupo de lípidos fenólicos con carácter anfifílico [49] (Figura 3D), con mayor concentración en el salvado de los cereales, principalmente en la testa [50]. Los alquilresorcinoles tienen un amplio espectro de bioactividad, con beneficios potenciales para la salud humana, que incluye propiedades antiinflamatorias [51], inhibición de enzimas, prevención de infecciones bacterianas o fúngicas y reducción de la absorción de colesterol [52]. Estudios *in vitro* sugieren que los alquilresorcinoles pueden prevenir varios tipos de cáncer, principalmente de colon [53]. También, se ha encontrado correlación entre una alta concentración de alquilresorcinoles en plasma, derivado de consumir grano entero, y un menor riesgo de diabetes gestacional [54]. Son tantos los beneficios reportados para los alquilresorcinoles, que se ha sugerido utilizarlos como índice de calidad de granos y sus productos, como la harina y el pan [49]. Puesto que aproximadamente un 13% de los lípidos totales del salvado son alquilresorcinoles [55], el aislar las fracciones de salvado ricas en estos, para enriquecer alimentos, es una buena área de oportunidad para procesos industriales [42].

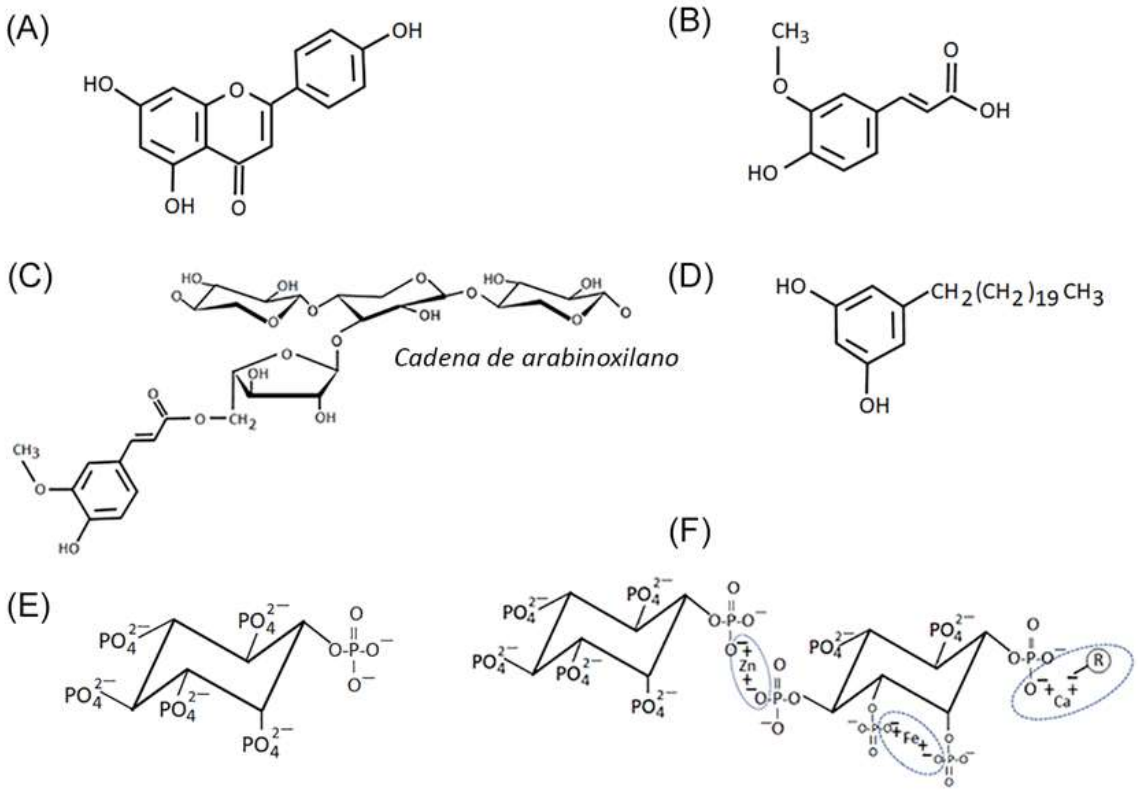


Figura 3. Algunos de los compuestos importantes en el salvado de trigo: (A) estructura aglicona de la apigenina, el flavonoide más abundante; (B) molécula de ácido ferúlico; (C) ácido ferúlico esterificado a la cadena de arabinoxilano; (D) heneicosilresorcinol (C21: 0), el alquilresorcinol más abundante; (E) estructura del ácido fítico; (F) ácido fítico complejado con cationes para formar fitatos. R = proteína [Software: ChemDraw Pro, con edición en Photoshop].

4.6. Fuente de proteínas de buena calidad

El salvado de trigo contiene entre 14 y 19% en peso de proteínas. Se han detectado cientos de proteínas diferentes entre las capas del salvado, la gran mayoría con actividad biológica contra los tipos de estrés que afectan al grano en desarrollo [56]. Debido a la extensa variedad de proteínas con funciones tan heterogéneas, la diversidad de su estructura primaria también es enorme. Así, la calidad de las proteínas del salvado es superior a las de la harina, pues posee un mejor balance de aminoácidos esenciales [57]. Esta característica ha capturado la atención de los tecnólogos en alimentos para preparar concentrados de proteínas de salvado, con el fin de enriquecer los alimentos [58]. Sin embargo, la extracción de proteínas desde la matriz del salvado es un reto tecnológico que ha limitado la oferta de estas en el mercado [59]. Ante ello, la innovación resulta necesaria para establecer procesos sostenibles, que permitan aprovechar nutricionalmente a estas macromoléculas.

Otros usos para las proteínas del salvado de trigo se basan en su hidrólisis para la obtención de péptidos con actividad farmacológica, pues sus efectos benéficos han sido ligados con la reducción de la presión arterial [60]. Recientemente, se han propuesto alternativas de aprovechamiento en el contexto de tecnologías innovadoras, como la nanotecnología, en particular la producción de nanopartículas con aplicaciones potenciales en la industria de alimentos, farmacéutica y de materiales [61; 62; 63; 64]. Asimismo, se ha reportado el potencial de extractos acuosos de salvado de trigo, ricos en proteína, fibra y fósforo, para ser utilizados como andamios en la producción *in vitro* de biominerales [41], tema discutido en una sección anterior. Los biominerales encuentran aplicaciones en amplios sectores de la industria.

5. Lo malo del salvado de trigo

Existen algunos factores que limitan la incorporación de salvado en la alimentación humana. Estos tienen relación con la respuesta fisiológica, aceptabilidad sensorial, inconvenientes tecnológicos y presencia de factores antinutricionales. Los factores antinutricionales también afectan la disponibilidad de minerales en la alimentación animal y resultan en un impacto ambiental negativo.

5.1. Respuesta fisiológica al consumo de salvado de trigo

Aunque la fibra dietaria previene el estreñimiento, un consumo excesivo lo exacerba y puede causar distensión abdominal, flatulencia y diarrea; incluso el consumo en cantidades apropiadas puede inducir estos síntomas en algunas personas [65]. Se ha documentado que los mecanismos de la respuesta fisiológica a la fibra dependen de muchos factores. Es el caso del efecto laxante de las partículas grandes de fibra insoluble de salvado, el cual se debe al efecto mecánico irritante sobre la mucosa del intestino grueso, que induce la secreción de moco y agua y resulta en heces blandas. Las partículas finas no producen esta respuesta, por lo que el efecto laxante es nulo e incluso puede resultar en estreñimiento. Por otro lado, para las personas con síndrome de colon irritable el efecto irritante de las partículas grandes de fibra insoluble hace que su consumo sea una mala opción [66]. Existen muchos conceptos erróneos sobre los efectos físicos de la fibra, revisados recientemente por [66], que ha llevado a la conclusión inequívoca de que no todos los suplementos de fibra son adecuados para todas las personas. En este sentido, un área de oportunidad para la industria de alimentos es el desarrollo de productos con fibra dirigidos a grupos de población con diferentes necesidades, es decir hechos a la medida.

5.2. Factores sensoriales limitantes para la incorporación de salvado de trigo en alimentos

Los sabores amargos derivados de los compuestos fenólicos, una alta actividad de polifenoloxidasa, la rancidez que resulta de la lipólisis y la oxidación de lípidos, además de una sensación arenosa al paladar, son factores que reducen la aceptabilidad del consumidor por los productos que contienen salvado [67; 68]. Los métodos para estabilizar el salvado no deben provocar cambios indeseables como la pérdida de nutrientes y la capacidad antioxidante. El tratamiento con microondas, además de reducir significativamente la actividad de la enzima lipasa y el contenido de ácidos grasos libres, resulta en una mayor concentración de compuestos fenólicos y una mayor capacidad antioxidante [69]. La explosión de vapor es otro tratamiento que estabiliza el salvado de trigo mediante la inactivación de lipasa y peroxidasa, sin pérdida de proteínas y lípidos, además de aumentar el contenido de flavonoides y fenoles totales, así como la capacidad de captación de radicales libres [70]. Sin embargo, algunos de los pretratamientos se encuentran aún en etapa experimental, por lo que aún no se conoce la viabilidad económica y la sostenibilidad global. La sensación arenosa se puede evitar al reducir el tamaño de las partículas a un tamaño ultrafino. El salvado ultrafino y estabilizado es una de las alternativas recientes que ya existen en el mercado, con la ventaja adicional de que puede ser metabolizado de manera más eficiente por las bacterias intestinales [10].

5.3. Inconvenientes tecnológicos del uso de salvado de trigo en el procesamiento de alimentos

Desde el punto de vista tecnológico, quizá el mayor inconveniente sea el que limita el uso de salvado de trigo en la elaboración de pan. La presencia o la inclusión de salvado en la harina reduce el volumen de la hogaza, lo que ocasiona cambios de textura y una percepción visual negativa [71]. Lo anterior se debe a que el salvado, además de diluir al gluten [72], incide en la formación de láminas beta adicionales en las proteínas, lo cual afecta negativamente el relajamiento estructural [73]. Se sabe de la existencia de varios métodos o modificaciones a los métodos de procesamiento ya existentes, para mejorar las propiedades funcionales del salvado de trigo y el perfil nutricional. Este tópico ha sido revisado recientemente [74]. En general, la reducción del tamaño de partícula, la aplicación de diferentes pretratamientos térmicos y térmico-mecánicos, solos o en combinación, como el autoclaveado, microondas, explosión de vapor, extrusión, fermentación y tratamiento enzimático, en muchos casos mejoran las propiedades funcionales del salvado de trigo, así como el perfil de sus componentes bioactivos [74]. Los beneficios dependen del tipo de tratamiento y se potencian cuando se combinan varios de estos. Cabe resaltar que un hallazgo interesante de los autores de dicha revisión es que sólo una pequeña fracción de los estudios desarrollados utilizó el salvado pretratado para enriquecer alimentos, lo que, según ellos mismos, este ingrediente funcional es un tema abierto para investigación [74].

La modificación de la fibra presente en los residuos agroindustriales constituye en sí mismo un tópico de actualidad. En la literatura aparecen métodos físicos, químicos y biológicos para modificar la fibra dietaria de diversas fuentes con la finalidad de mejorar las propiedades funcionales. Una revisión actual sobre este tema puede ser consultada en [75]. En el caso específico del salvado de trigo, la trituración ultrafina reduce la capacidad de retención de agua y de aceite de la fibra insoluble, pero aumenta la adsorción de la glucosa y del ión nitrito [76]. Un método de modificación química, como la

carboximetilación, mejora la retención de agua y la capacidad de adsorción de glucosa, mientras que la hidrólisis enzimática con celulasa y xylanasa aumenta significativamente la retención de aceite y de adsorción del ión nitrito; tanto la carboximetilación como la trituración ultrafina y la hidrólisis, mejoran el perfil antioxidante [76]. También se conoce que la hidrólisis de fibra soluble e insoluble de salvado de trigo, causada por un complejo enzimático extraído de los caracoles (llamado enzima *snail*), digiere prácticamente todos los componentes de la fibra; dicho complejo consiste en más de 20 tipos de enzimas. El tratamiento resulta en aumentos significativos de la capacidad de retención de aceite de la fibra insoluble, así como la capacidad de adsorción de glucosa y de colesterol de la fibra soluble e insoluble; además, se mejora considerablemente la capacidad de secuestrar radicales libres y el poder reductor de ambos tipos de fibra [77].

5.4.Presencia de factores antinutricionales

Debido a su alto contenido de ácido fítico, el salvado es una fuente excelente de fósforo, pero este no se asimila debido a la carencia de la enzima fitasa en los animales monogástricos, incluso en el hombre [78]. El ácido fítico consiste de una molécula de mio-inositol, con un grupo fosfato unido a cada átomo de carbono (Figura 3E). La carga negativa de los grupos fosfato es propicia para la unión electrostática de cationes, que forman las sales respectivas o fitatos. De hecho, el fitato es la forma más común del ácido fítico en el salvado. Cuando se unen cationes divalentes, como el hierro, calcio y zinc, estos actúan como puentes para la formación de complejos más grandes, por ejemplo, fitato-proteínas (Figura 3F). Esta capacidad secuestrante de los minerales por el ácido fítico, convierte a este en un factor antinutricional, ya que impide la absorción correcta de micronutrientes, como el zinc y el hierro. El alto consumo de alimentos ricos en fitatos representa un riesgo, pues una de las principales causas de malnutrición es la deficiencia de zinc y hierro, particularmente en los países en desarrollo [79].

En cuanto a nutrición, se ha sugerido que la expresión transgénica de fitasa en trigo podría ser una alternativa para aumentar la biodisponibilidad de hierro y zinc y así combatir la deficiencia de estos micronutrientes en la dieta humana [80]. Tecnológicamente, el tema de la defitinización del salvado se ha abordado ampliamente en la literatura [78]. Los estudios han mostrado que el autoclaveado entre pH 3.5 y 4 y el bioprocesamiento, es decir, la fermentación y el tratamiento enzimático, son pretratamientos efectivos para reducir el contenido de ácido fítico [81; 82]. No obstante, se requiere innovar para implementar tratamientos más sostenibles, es decir, reducir el consumo energético y minimizar el uso de químicos.

5.5.Impactos ambientales negativos del salvado de trigo

Cuando los costos de transporte hacen incosteable el comercio de salvado de trigo, este se dispone como desperdicio y se incinera, lo que resulta en una carga ambiental [32] (Figura 1). Sin embargo, un problema mayor es que el salvado de trigo se usa extensivamente en la alimentación animal, de manera que en las heces se excretan grandes cantidades de fósforo. Este fósforo termina eventualmente en los cuerpos de agua, que causa la eutrofización y aumento de la demanda bioquímica de oxígeno [83]. Desde este punto de vista, la inclusión de salvado de trigo en la alimentación animal no es un proceso sostenible. Existe investigación abundante dirigida a resolver este problema. La alternativa más utilizada es la adición de fitasas exógenas a los alimentos balanceados

[83; 84], pero diferentes factores como el costo, la inactivación de la enzima por las altas temperaturas requeridas para peletizar el alimento, la pérdida de actividad enzimática durante el almacenamiento, así como el estrecho rango de pH óptimo de la fitasa, limitan su uso [85]. Otro enfoque es el desarrollo de líneas de trigo transgénico con mayor capacidad de expresión de fitasa [86], así como de cerdos, también transgénicos, que expresen esta enzima [87]. Puesto que el uso de organismos transgénicos no es aceptado en su totalidad, se requiere de estrategias innovadoras para resolver la ausencia de ácido fítico en el salvado de trigo.

6. Lo feo del salvado de trigo

6.1. En el salvado se concentran pesticidas y metales pesados

Durante el cultivo y almacenamiento de trigo se utilizan diferentes pesticidas, los cuales permanecen como residuos en los granos, principalmente en el salvado [88; 89]. La molienda, donde se separa el salvado del endospermo, ocasiona que la concentración residual de pesticidas sea menor en la harina [90], cuyos niveles máximos permitidos los establecen las autoridades en salud de diferentes países o regiones del mundo. Algunas técnicas de procesamiento disipan significativamente algunos pesticidas presentes en la harina [91], sin embargo, el procesamiento puede incluso aumentar su concentración, en ciertas ocasiones, lo que es motivo de preocupación, porque sugiere un riesgo para la salud de los seres humanos [92]. Cuando se trata del salvado para consumo humano, el problema adquiere mayor interés.

Entre los pesticidas destaca el glifosato [N-(fosfonometil)glicina-isopropilamina], un herbicida de amplio espectro que ha causado gran controversia. Además de ser considerado como posible agente carcinogénico, algunos autores lo han visto como el probable causante de la creciente incidencia de intolerancia al gluten [93]. La agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) lo reclasificó en el grupo 2A, es decir, como probable carcinogénico para humanos, con base en un análisis de la literatura científica disponible [94]. No obstante, a través de diversas evaluaciones, algunas de ellas desarrolladas por organizaciones internacionales, se ha concluido que ni el glifosato ni su principal producto de degradación, el ácido aminometilfosfónico (AMPA) tienen efectos conocidos sobre la salud humana; además de que los niveles de exposición por la dieta son bajos [95; 96; 97]. Recientemente, en Canadá, se analizaron los niveles de glifosato en 7955 alimentos vendidos al menudeo, tanto domésticos como importados. Sólo en el 44.3% de los alimentos analizados se encontraron niveles detectables de glifosato, el 99.4% de los cuales cumplió con las regulaciones canadienses. Cabe mencionar que, en ese mismo estudio, las legumbres y los productos derivados del trigo, incluso el salvado en estos últimos, tuvieron los niveles más altos de glifosato, pero cumplieron con las regulaciones [95].

Mientras las controversias con un tipo particular de pesticida continúan, el problema es más general. Se estima que anualmente se utilizan casi tres billones de kg de pesticidas en el mundo [98]. Aunque los niveles residuales máximos de pesticidas en diferentes alimentos están regulados, la población está constantemente expuesta a ellos a través de diferentes rutas, lo cual no sólo es un riesgo para la salud sino también para el equilibrio de los ecosistemas. Este es un tema que merece una revisión aparte, por el momento sólo basta para afirmar que la tendencia actual continúa hacia el uso de biopesticidas [98].

Con respecto a los metales pesados, se sabe que los granos de cereales pueden almacenarlos y el trigo no es la excepción. De hecho, como se discutió en la sección 3.2, el salvado de trigo se ha propuesto para la remoción de metales pesados en agua. Pero surge un problema cuando los metales pesados se encuentran en el salvado destinado al consumo humano o animal. Los estudios sugieren que el mismo salvado de trigo puede ser un agente efectivo para prevenir la intoxicación contra cadmio, debido a la capacidad de absorción que tiene sobre este metal pesado [99]. Una tendencia fuerte en cuanto al salvado de trigo es la producción de salvado orgánico, lo que evitaría el problema de la presencia de pesticidas y metales pesados.

7. Retos

El desafío sigue siendo innovar en cuanto a establecer métodos de procesamiento que hagan del salvado de trigo un subproducto altamente sostenible. Además, existe la necesidad de aislar los componentes de alto valor para aplicaciones a escala industrial, donde se requiere un grado alto de pureza. Los métodos convencionales, como la extracción con solventes, tienen el inconveniente de provocar un bajo rendimiento y propiciar la presencia de residuos del solvente en el producto terminado. En este sentido, existe una tendencia hacia métodos de extracción "verdes", entre los que se encuentran los fluidos supercríticos y líquidos presurizados, así como la extracción asistida por microondas y ultrasonidos [100]. La extracción de fluidos supercríticos asistida por enzimas es un método destinado a la extracción de compuestos fenólicos, aceites esenciales, pigmentos y vitaminas [101]. Sin embargo, para llevarlo a escala industrial y convertirlo en un proceso altamente sostenible, es necesario tomar en cuenta el factor económico y el consumo energético [101].

8. Observaciones finales y conclusiones

Lo bueno del salvado de trigo está representado por su amplia variedad de compuestos bioactivos con beneficios comprobados para la salud humana, además de ser una fuente potencial de productos de alto valor. Lo malo son aquellos factores que limitan el consumo humano del salvado, como la aceptabilidad sensorial, los inconvenientes tecnológicos y la presencia de factores antinutricionales. Además, dado que la mayor parte del salvado de trigo está destinado a la alimentación animal, se genera una carga medioambiental. Lo feo es la percepción de riesgo que podrían tener las personas con relación al consumo de salvado, debido a la capacidad que tiene para almacenar plaguicidas y metales pesados. Todo lo anterior, conduce a que el salvado de trigo parezca un subproducto no sostenible. Afortunadamente, la evidencia disponible hasta la fecha indica que lo bueno supera a lo malo y lo feo.

Existen informes sobre tratamientos prometedores para superar las causas que limitan el consumo de salvado de trigo por los seres humanos. Invariablemente, se sugiere la viabilidad de incorporar los componentes del salvado de trigo a los alimentos convencionales, para incrementar su valor nutricional y poder nutracéutico [102]. Con respecto a plaguicidas y metales pesados, de acuerdo con los estándares internacionales, las concentraciones de estos compuestos cumplen con la normatividad vigente. Además, se sugiere que las buenas prácticas de procesamiento y una dieta saludable, minimizan el riesgo. Todo lo anterior hace atractiva la valorización del salvado de trigo en un contexto de sostenibilidad, que es una tendencia actual. Esto último se confirma con

más de 1,000 publicaciones científicas sobre salvado de trigo, de acuerdo con la base de datos *Scopus*, sólo en el período 2015-2021.

9. Agradecimientos

Los autores desean mostrar su agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México, por el financiamiento otorgado a través del proyecto A1-S-40197, aprobado en la Convocatoria de Ciencia Básica 2017-2018.

10. Referencias

[1] FAO. (2021). Science, technology and innovation are key to agri-food systems transformation. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Consultado el 3 de agosto de 2021. http://www.fao.org/news/story/en/item/1415298/icode/

[2] FAO. (2021). Food systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Consultado el 3 de agosto de 2021. http://www.fao.org/food-systems/en/

[3] Elizabeth, L., Machado, P., Zinöcker, M., Baker, P., & Lawrence, M. (2020). Ultra-processed foods and health outcomes: A narrative review. *Nutrients, 12*, 1955. https://doi.org/10.3390/nu12071955

[4] Rauber, F., Chang, K., Vamos, E. P., da Costa Louzada, M. L., Monteiro, C. A., Millett, C., & Levy, R. B. (2021). Ultra-processed food consumption and risk of obesity: A prospective cohort study of UK biobank. *European Journal of Nutrition, 60*, 2169-2180. https://doi.org/10.1007/s00394-020-02367-1

[5] Rauber, F., Steele, E. M., Louzada, M. L. d. C., Millett, C., Monteiro, C. A., & Levy, R. B. (2020). Ultra-processed food consumption and indicators of obesity in the United Kingdom population (2008-2016). *PloS one, 15*, e0232676-e0232676. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232676

[6] Machado, P. P., Steele, E. M., Levy, R. B., da Costa Louzada, M. L., Rangan, A., Woods, J., Gill, T., Scrinis, G., & Monteiro, C. A. (2020). Ultra-processed food consumption and obesity in the australian adult population. *Nutrition & Diabetes, 10*, 39. https://doi.org/10.1038/s41387-020-00141-0

[7] Juul, F., Martinez-Steele, E., Parekh, N., Monteiro, C. A., & Chang, V. W. (2018). Ultra-processed food consumption and excess weight among US adults. *The British Journal of Nutrition, 120*, 90-100. https://doi.org/10.1017/s0007114518001046

[8] Grewal, J., Sadaf, A., Yadav, N., & Khare, S. K. (2020). Chapter 5 - agroindustrial waste based biorefineries for sustainable production of lactic acid. In T. Bhaskar, A. Pandey, E. R. Rene & D. C. W. Tsang (Eds.), *Waste biorefinery* (pp. 125-153): Elsevier.

[9] Fernández-Ochoa, Á., Leyva-Jiménez, F. J., Pimentel-Moral, S., del Carmen Villegas-Aguilar, M., Alañón, M. E., Segura-Carretero, A., & de la Luz Cádiz-Gurrea, M. (2021). Revalorisation of agro-industrial wastes into high value-added products. In Inamuddin & A. Khan (Eds.), *Sustainable bioconversion of waste to value added products* (pp. 229-245). Cham: Springer International Publishing.

[10] Fortune. (2021). Wheat bran market size. Fortune Business Insights. Consultado el 15 de agosto de 2021. https://www.fortunebusinessinsights.com/wheat-bran-market-103279

[11] Hingsamer, M., & Jungmeier, G. (2019). Chapter five - biorefineries. In C. Lago, N. Caldés & Y. Lechón (Eds.), *The role of bioenergy in the bioeconomy* (pp. 179-222): Academic Press.

[12] Wieser, H., Koehler, P., & Scherf, K. A. (2020). Chapter 5 - Wheat-based raw

materials. In H. Wieser, P. Koehler & K. A. Scherf (Eds.), *Wheat - an exceptional crop* (pp. 103-131): Woodhead Publishing.

[13] FAO. (2019). Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Consultado el 3 de agosto de 2021. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

[14] Gooding, M. J. (2009). The wheat crop. In K. Khan, and Shewry, P. (Ed.), *Wheat chemistry and technology* (4th ed., pp. 19-49). St. Paul MN: AACC International Inc.

[15] Prückler, M., Siebenhandl-Ehn, S., Apprich, S., Höltinger, S., Haas, C., Schmid, E., & Kneifel, W. (2014). Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization. *LWT - Food Science and Technology, 56*, 211-221. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.004

[16] TRIDGE. (2020). Overview of global wheat bran market. Consultado el 3 de agosto de 2021. https://acortar.link/hWC5nv

[17] TRIDGE. (2020). Overview of wheat bran market in Mexico. Consultado el 17 de febrero de 2022. https://www.tridge.com/intelligences/wheat-bran1/MX

[18] Stevenson, L., Phillips, F., O'Sullivan, K., & Walton, J. (2012). Wheat bran: Its composition and benefits to health, a european perspective. *International Journal of Food Sciences and Nutrition, 63*, 1001-1013. https://doi.org/10.3109/09637486.2012.687366

[19] Safaripour, M., Hossain, K. G., Ulven, C. A., & Pourhashem, G. (2021). Environmental impact tradeoff considerations for wheat bran-based biocomposite. *Science of the Total Environment, 781*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146588

[20] TRIDGE. (2021). Price entries of wheat bran. Consultado el 29 de julio de 2021. https://www.tridge.com/intelligences/wheat-bran1/price

[21] Barrett, E. M., Batterham, M. J., Ray, S., & Beck, E. J. (2019). Whole grain, bran and cereal fibre consumption and CVD: A systematic review. *The British Journal of Nutrition, 121*, 914-937. https://doi.org/10.1017/s000711451900031x

[22] Wang, M., Wichienchot, S., He, X., Fu, X., Huang, Q., & Zhang, B. (2019). *In vitro* colonic fermentation of dietary fibers: Fermentation rate, short-chain fatty acid production and changes in microbiota. *Trends in Food Science & Technology, 88*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.005

[23] Cheng, W., Sun, Y., Fan, M., Li, Y., Wang, L., & Qian, H. (2021). Wheat bran, as the resource of dietary fiber: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1913399

[24] Badiali, D., Corazziari, E., Habib, F. I., Tomei, E., Bausano, G., Magrini, P., Anzini, F., & Torsoli, A. (1995). Effect of wheat bran in treatment of chronic nonorganic constipation. *Digestive Diseases and Sciences, 40*, 349-356. https://doi.org/10.1007/BF02065421

[25] Elmadbouly, M. A. E. (2021). Effect of wheat bran on anthropometric measures, serum glucose and lipid profile in type 2 diabetes patients. *Pakistan Journal of Biological Sciences, 24*, 345-349. https://doi.org/10.3923/pjbs.2021.345.349

[26] Teigiserova, D. A., Bourgine, J., & Thomsen, M. (2021). Closing the loop of cereal waste and residues with sustainable technologies: An overview of enzyme production via fungal solid-state fermentation. *Sustainable Production and*

Consumption, 27, 845-857. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.010

[27] Costa, R. D. S., de Almeida, S. S., Cavalcanti, E. D. C., Freire, D. M. G., Moura-Nunes, N., Monteiro, M., & Perrone, D. (2021). Enzymes produced by solid state fermentation of agro-industrial by-products release ferulic acid in bioprocessed whole-wheat breads. *Food Research International, 140*. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109843

[28] Heidary Vinche, M., Khanahmadi, M., Ataei, S. A., & Danafar, F. (2021). Investigation of the effects of fermented wheat bran extract containing beta-glucanase on beta-glucan of cereals used in animal feed. *Cereal Chemistry, 98*, 651-659. https://doi.org/10.1002/cche.10409

[29] Cripwell, R., Favaro, L., Rose, S. H., Basaglia, M., Cagnin, L., Casella, S., & van Zyl, W. (2015). Utilisation of wheat bran as a substrate for bioethanol production using recombinant cellulases and amylolytic yeast. *Applied Energy, 160*, 610-617. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.062

[30] He, C., Sampers, I., & Raes, K. (2021). Dietary fiber concentrates recovered from agro-industrial by-products: Functional properties and application as physical carriers for probiotics. *Food Hydrocolloids, 111*. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106175

[31] Jocquel, C., Muzard, M., Plantier-Royon, R., & Rémond, C. (2021). An integrated enzymatic approach to produce pentyl xylosides and glucose/xylose laurate esters from wheat bran. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 9*. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.647442

[32] Rahman, A., Ulven, C. A., Johnson, M. A., Durant, C., & Hossain, K. G. (2017). Pretreatment of wheat bran for suitable reinforcement in biocomposites. *Journal of Renewable Materials, 5*, 62-73. https://doi.org/10.7569/JRM.2017.634133

[33] Avila, E. F. M., Pedraza, M. C. E., & Aguilar, D. L. G. (2021). Design and validation of a system for hexavalent chromium adsorption in tannery effluents using orange peel and wheat bran. *Tecnologia y Ciencias del Agua, 12*, 1-25. https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-03-01

[34] Farajzadeh, M. A., & Monji, A. B. (2004). Adsorption characteristics of wheat bran towards heavy metal cations. *Separation and Purification Technology, 38*, 197-207. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.11.005

[35] Ogata, F., Kangawa, M., Iwata, Y., Ueda, A., Tanaka, Y., & Kawasaki, N. (2014). A study on the adsorption of heavy metals by using raw wheat bran bioadsorbent in aqueous solution phase. *Chemical & Pharmaceutical Bulletin, 62*, 247-253. https://doi.org/10.1248/cpb.c13-00701

[36] Ogata, F., Kangawa, M., Tominaga, H., Tanaka, Y., Ueda, A., Iwata, Y., & Kawasaki, N. (2013). Study of adsorption mechanism of heavy metals onto waste biomass (wheat bran). *Journal of Oleo Science, 62*, 949-953. https://doi.org/10.5650/jos.62.949

[37] Brier, N. D., Gomand, S. V., Donner, E., Paterson, D., Delcour, J. A., Lombi, E., & Smolders, E. (2015). Distribution of minerals in wheat grains (*Triticum aestivum* L.) and in roller milling fractions affected by pearling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63*, 1276-1285. https://doi.org/10.1021/jf5055485

[38] Gouran, A., Aghel, B., & Nasirmanesh, F. (2021). Biodiesel production from waste cooking oil using wheat bran ash as a sustainable biomass. *Fuel, 295*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120542

[39] Toshima, T., Hamai, R., Tafu, M., Takemura, Y., Fujita, S., Chohji, T., Tanda, S., Li, S., & Qin, G. W. (2014). Morphology control of brushite prepared by aqueous solution synthesis. *Journal of Asian Ceramic Societies, 2*, 52-56. https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.01.004

[40] Bohner, M., Tadier, S., van Garderen, N., de Gasparo, A., Döbelin, N., & Baroud, G. (2013). Synthesis of spherical calcium phosphate particles for dental and orthopedic applications. *Biomatter, 3*, e25103. 10.4161/biom.25103

[41] 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. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.03.003

[42] Laddomada, B., Caretto, S., & Mita, G. (2015). Wheat bran phenolic acids: Bioavailability and stability in whole wheat-based foods. *Molecules (Basel, Switzerland), 20*, 15666-15685. https://doi.org/10.3390/molecules200915666

[43] Martín-García, B., Gómez-Caravaca, A. M., Marconi, E., & Verardo, V. (2021). Distribution of free and bound phenolic compounds, and alkylresorcinols in wheat aleurone enriched fractions. *Food Research International, 140*. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109816

[44] Yadav, M. P., Kaur, A., Singh, B., Simon, S., Kaur, N., Powell, M., & Sarker, M. (2021). Extraction and characterization of lipids and phenolic compounds from the brans of different wheat varieties. *Food Hydrocolloids, 117*. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106734

[45] Singh, B., Sharma, H. K., & Sarkar, B. C. (2012). Optimization of extraction of antioxidants from wheat bran (*Triticum* spp.) using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology, 49*, 294-308. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0276-5

[46] Kimura, T., & Takamatsu, J. (2015). Chapter 92 - Ferulic acid and angelica archangelica extract in dementia: Effects on cognitive functions and behavioral and psychological symptoms of dementia. In C. R. Martin & V. R. Preedy (Eds.), *Diet and nutrition in dementia and cognitive decline* (pp. 993-1001). San Diego: Academic Press.

[47] Juhnevica-Radenkova, K., Kviesis, J., Moreno, D. A., Seglina, D., Vallejo, F., Valdovska, A., & Radenkovs, V. (2021). Highly-efficient release of ferulic acid from agro-industrial by-products via enzymatic hydrolysis with cellulose-degrading enzymes: Part I–the superiority of hydrolytic enzymes versus conventional hydrolysis. *Foods, 10*. https://doi.org/10.3390/foods10040782

[48] Martín-Diana, A. B., García-Casas, M. J., Martínez-Villaluenga, C., Frías, J., Peñas, E., & Rico, D. (2021). Wheat and oat brans as sources of polyphenol compounds for development of antioxidant nutraceutical ingredients. *Foods, 10*, 1-21. https://doi.org/10.3390/foods10010115

[49] Tsirivakou, A., Melliou, E., & Magiatis, P. (2020). A method for the rapid measurement of alkylresorcinols in flour, bread and related products based on 1H qNMR. *Foods, 9*, 1025. https://doi.org/doi:10.3390/foods9081025

[50] Onipe, O. O., Jideani, A. I. O., & Beswa, D. (2015). Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal

food products. *International Journal of Food Science & Technology, 50*, 2509-2518. https://doi.org/10.1111/ijfs.12935

[51] Liu, J., Hao, Y., Wang, Z., Ni, F., Wang, Y., Gong, L., Sun, B., & Wang, J. (2018). Identification, quantification, and anti-inflammatory activity of 5-n-alkylresorcinols from 21 different wheat varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66*, 9241-9247. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02911

[52] Tian, S., Sun, Y., Chen, Z., & Zhao, R. (2020). Bioavailability and bioactivity of alkylresorcinols from different cereal products. *Journal of Food Quality, 2020*, 5781356. https://doi.org/10.1155/2020/5781356

[53] Kruk, J., Aboul-Enein, B., Bernstein, J., & Marchlewicz, M. (2017). Dietary alkylresorcinols and cancer prevention: A systematic review. *European Food Research and Technology, 243*, 1693-1710. https://doi.org/10.1007/s00217-017-2890-6

[54] Tryggvadottir, E. A., Halldorsson, T. I., Landberg, R., Hrolfsdottir, L., Birgisdottir, B. E., Magnusdottir, O. K., Hreidarsdottir, I. T., Hardardottir, H., & Gunnarsdottir, I. (2021). Higher alkylresorcinol concentrations, a consequence of whole-grain intake, are inversely associated with gestational diabetes mellitus in iceland. *The Journal of Nutrition, 151*, 1159-1166. https://doi.org/10.1093/jn/nxaa449

[55] Prinsen, P., Gutiérrez, A., Faulds, C. B., & del Río, J. C. (2014). Comprehensive study of valuable lipophilic phytochemicals in wheat bran. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 62*, 1664-1673. https://doi.org/10.1021/jf404772b

[56] Balandrán-Quintana, R. R., & Mendoza-Wilson, A. M. (2018). Wheat bran proteins. In M. JM & R. K (Eds.), *Bioactive molecules in food. Reference series in phytochemistry.* (pp. 1-24): Springer, Cham.

[57] Shewry, P. R., D'Ovidio, R., Lafiandra, D., Jenkins, J. A., Mills, E. N. C., & Békés, F. (2009). Wheat grain proteins. In K. Khan & P. R. Shewry (Eds.), *Wheat: Chemistry and technology* (4th ed., pp. 223-298). St. Paul, MN: AACC International.

[58] Alzuwaid, N. T., Sissons, M., Laddomada, B., & Fellows, C. M. (2020). Nutritional and functional properties of durum wheat bran protein concentrate. *Cereal Chemistry, 97*, 304-315. https://doi.org/10.1002/cche.10246

[59] Balandrán-Quintana, R. R. (2018). 5 - recovery of proteins from cereal processing by-products. In C. M. Galanakis (Ed.), *Sustainable recovery and reutilization of cereal processing by-products* (pp. 125-157): Woodhead Publishing.

[60] Nogata, Y., Nagamine, T., Yanaka, M., & Ohta, H. (2009). Angiotensin I converting enzyme inhibitory peptides produced by autolysis reactions from wheat bran. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57*, 6618-6622. https://doi.org/10.1021/jf900857w

[61] Chaquilla-Quilca, G., Balandran-Quintana, R. R., Azamar-Barrios, J. A., Ramos-Clamont Montfort, G., Mendoza-Wilson, A. M., Mercado-Ruiz, J. N., Madera-Santana, T. J., Lopez-Franco, Y. L., & Luna-Valdez, J. G. (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. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.005

[62] 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*. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129194

[63] Luna-Valdez, J. G., Balandrán-Quintana, R. R., Azamar-Barrios, J. A., Ramos Clamont-Montfort, G., Mendoza-Wilson, A. M., Madera-Santana, T. J., Rascón-Chu, A., & Chaquilla-Quilca, G. (2019). Assembly of biopolymer particles after thermal conditioning of wheat bran proteins contained in a 21–43 kDa size exclusion chromatography fraction. *Food Hydrocolloids, 94*, 144-151. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.003

[64] Luna-Valdez, J. G., Balandrán-Quintana, R. R., Azamar-Barrios, J. A., Ramos Clamont-Montfort, G., Mendoza-Wilson, A. M., Mercado-Ruiz, J. N., Madera-Santana, T. J., Rascon-Chu, A., & Chaquilla-Quilca, G. (2017). Structural and physicochemical characterization of nanoparticles synthesized from an aqueous extract of wheat bran by a cold-set gelation/desolvation approach. *Food Hydrocolloids, 62*, 165-173. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.07.034

[65] Eswaran, S., Muir, J., & Chey, W. D. (2013). Fiber and functional gastrointestinal disorders. *The American Journal of Gastroenterology, 108*, 718-727. https://doi.org/10.1038/ajg.2013.63

[66] McRorie, J. W., & McKeown, N. M. (2017). Understanding the physics of functional fibers in the gastrointestinal tract: An evidence-based approach to resolving enduring misconceptions about insoluble and soluble fiber. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics, 117*, 251-264. https://doi.org/10.1016/j.jand.2016.09.021

[67] Duţă, D. E., Culeţu, A., & Mohan, G. (2018). 10 - Reutilization of cereal processing by-products in bread making. In C. M. Galanakis (Ed.), *Sustainable recovery and reutilization of cereal processing by-products* (pp. 279-317): Woodhead Publishing.

[68] Habuš, M., Novotni, D., Gregov, M., Štifter, S., Čukelj Mustač, N., Voučko, B., & Ćurić, D. (2021). Influence of particle size reduction and high-intensity ultrasound on polyphenol oxidase, phenolics, and technological properties of wheat bran. *Journal of Food Processing and Preservation, 45*. https://doi.org/10.1111/jfpp.15204

[69] Liu, J., Zhang, J., Wang, W., & Hou, H. (2021). Effects of microwave treatment on the stability and antioxidant capacity of a functional wheat bran. *Food Science and Nutrition, 9*, 2713-2721. https://doi.org/10.1002/fsn3.2230

[70] Kong, F., Wang, L., Chen, H., & Zhao, X. (2021). Improving storage property of wheat bran by steam explosion. *International Journal of Food Science and Technology, 56*, 287-292. https://doi.org/10.1111/ijfs.14630

[71] Hemdane, S., Jacobs, P. J., Dornez, E., Verspreet, J., Delcour, J. A., & Courtin, C. M. (2016). Wheat (triticum aestivum l.) bran in bread making: A critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15*, 28-42. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12176

[72] Gómez, M., Gutkoski, L. C., & Bravo-Núñez, Á. (2020). Understanding whole-wheat flour and its effect in breads: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 19*, 3241-3265. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12625

[73] Bock, J. E. (2019). The structural evolution of water and gluten in refined and whole grain breads: A study of soft and hard wheat breads from postmixing to final

product. *Cereal Chemistry, 96*, 520-531. https://doi.org/10.1002/cche.10152

[74] Onipe, O. O., Ramashia, S. E., & Jideani, A. I. O. (2021). Wheat bran modifications for enhanced nutrition and functionality in selected food products. *Molecules, 26*, 3918. https://doi.org/doi:10.3390/molecules26133918

[75] Gan, J., Xie, L., Peng, G., Xie, J., Chen, Y., & Yu, Q. (2021). Systematic review on modification methods of dietary fiber. *Food Hydrocolloids, 119*, 106872. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106872

[76] Zhang, M.-Y., Liao, A.-M., Thakur, K., Huang, J.-H., Zhang, J.-G., & Wei, Z.-J. (2019). Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution. *Food Chemistry, 297*, 124983. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124983

[77] Liu, X., Suo, K., Wang, P., Li, X., Hao, L., Zhu, J., Yi, J., Kang, Q., Huang, J., & Lu, J. (2021). Modification of wheat bran insoluble and soluble dietary fibers with snail enzyme. *Food Science and Human Wellness, 10*, 356-361. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.027

[78] 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*, 676-684. https://doi.org/10.1007/s13197-013-0978-y

[79] Cominelli, E., Pilu, R., & Sparvoli, F. (2020). Phytic acid and mineral biofortification strategies: From plant science to breeding and biotechnological approaches. *Plants (Basel), 9*. https://doi.org/10.3390/plants9050553

[80] Abid, N., Khatoon, A., Maqbool, A., Irfan, M., Bashir, A., Asif, I., Shahid, M., Saeed, A., Brinch-Pedersen, H., & Malik, K. A. (2017). Transgenic expression of phytase in wheat endosperm increases bioavailability of iron and zinc in grains. *Transgenic Research, 26*, 109-122. https://doi.org/10.1007/s11248-016-9983-z

[81] Özkaya, B., Turksoy, S., Özkaya, H., & Duman, B. (2017). Dephytinization of wheat and rice brans by hydrothermal autoclaving process and the evaluation of consequences for dietary fiber content, antioxidant activity and phenolics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 39*, 209-215. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.11.012

[82] Arte, E., Rizzello, C. G., Verni, M., Nordlund, E., Katina, K., & Coda, R. (2015). Impact of enzymatic and microbial bioprocessing on protein modification and nutritional properties of wheat bran. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63*, 8685-8693. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b03495

[83] Abbasi, F., Fakhur-un-Nisa, T., Liu, J., Luo, X., & Abbasi, I. H. R. (2019). Low digestibility of phytate phosphorus, their impacts on the environment, and phytase opportunity in the poultry industry. *Environmental Science and Pollution Research, 26*, 9469-9479. https://doi.org/10.1007/s11356-018-4000-0

[84] Huang, Y.-K., Zhao, L., Sun, H., Xu, X.-M., Maamer, J., Preynat, A., Sun, L.-H., & Qi, D.-S. (2021). A multicarbohydrase and phytase complex is able to compensate a nutrient-deficiency in growing-finishing pigs. *Animals, 11*, 1129. https://doi.org/doi:10.3390/ani11041129

[85] Baruah, K., Norouzitallab, P., & Pal, A. K. (2017). Chapter 24 - Development of low cost and eco-friendly feed for various candidate species for the sustainability of commercial aquaculture and reduction of aquatic pollution. In D. Bagchi & S. Nair (Eds.), *Developing new functional food and*

nutraceutical products (pp. 441-453). San Diego: Academic Press.

[86] Madsen, C. K., & Brinch-Pedersen, H. (2019). Molecular advances on phytases in barley and wheat. *International Journal of Molecular Sciences, 20*, 2459

[87] Wang, H., Li, G., Zhong, C., Mo, J., Sun, Y., Shi, J., Zhou, R., Li, Z., Wu, Z., Liu, D., & Zhang, X. (2020). Generation of multi-transgenic pigs using piggybac transposons co-expressing pectinase, xylanase, cellulase, β-1.3-1.4-glucanase and phytase. *Frontiers in Genetics, 11*, 597841. https://doi.org/10.3389/fgene.2020.597841

[88] Dobrinas, S., & Chirila, E. (2013). Distribution and quantification of pesticides in processed wheat grain fractions. In L.I. Simeonov *et al*. (Eds.), *Environmental Security Assessment and Management of Obsolete Pesticides in Southeast Europe*. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. (Vol. 134, pp. 257-264). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6461-3_23

[89] Vásquez-Castro, J., De Baptista, G., Gadanha-Junior, C., & Bracho-Pérez, J. (2020). Dissipation of fenitrothion and esfenvalerate in wheat grains, bran and flour. *Peruvian Journal of Agronomy, 4*, 40-47. http://dx.doi.org/10.21704/pja.v4i2.1510

[90] Bengston, M., Davies, R. A. H., Desmarchelier, J. M., Henning, R., Murray, W., Simpson, B. W., Snelson, J. T., Sticka, R., & Wallbank, B. E. (1983). Organophosphorothioates and synergised synthetic pyrethroids as grain protectants on bulk wheat. *Pesticide Science, 14*, 373-384. https://doi.org/10.1002/ps.2780140406

[91] Kaushik, G., Satya, S., & Naik, S. N. (2009). Food processing a tool to pesticide residue dissipation – A review. *Food Research International, 42*, 26-40. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.09.009

[92] Bordin, A. B., Minetto, L., do Nascimento Filho, I., Beal, L. L., & Moura, S. (2017). Determination of pesticide residues in whole wheat flour using modified QuEChERS and LC–MS/MS. *Food Analytical Methods, 10*, 1-9. https://doi.org/10.1007/s12161-016-0542-2

[93] Samsel, A., & Seneff, S. (2013). Glyphosate, pathways to modern diseases II: Celiac sprue and gluten intolerance. *Interdisciplinary Toxicology, 6*, 159-184. https://doi.org/10.2478/intox-2013-0026

[94] IARC. (2015). International Agency for Research on Cancer. In *Evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides*. IARC monographs volume 112: World Health Organization, Lyon, France. Consultado el 23 de agosto, 2021. https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/MonographVolume112-1.pdf

[95] Kolakowski, B. M., Miller, L., Murray, A., Leclair, A., Bietlot, H., & van de Riet, J. M. (2020). Analysis of glyphosate residues in foods from the canadian retail markets between 2015 and 2017. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 68*, 5201-5211. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07819

[96] Greim, H., Saltmiras, D., Mostert, V., & Strupp, C. (2015). Evaluation of carcinogenic potential of the herbicide glyphosate, drawing on tumor incidence data from fourteen chronic/carcinogenicity rodent studies. *Critical Reviews in Toxicology, 45*, 185-208. https://doi.org/10.3109/10408444.2014.1003423

[97] Tarazona, J. V., Court-Marques, D., Tiramani, M., Reich, H., Pfeil, R., Istace, F., & Crivellente, F. (2017). Glyphosate toxicity and carcinogenicity: A review of the

scientific basis of the european union assessment and its differences with IARC. *Archives of Toxicology, 91*, 2723-2743. https://doi.org/10.1007/s00204-017-1962-5

[98] Sharma, A., Shukla, A., Attri, K., Kumar, M., Kumar, P., Suttee, A., Singh, G., Barnwal, R., & Singla, N. (2020). Global trends in pesticides: A looming threat and viable alternatives. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 201*, 110812. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110812

[99] Li, Y., Liu, K., Shen, J., & Liu, Y. (2016). Wheat bran intake can attenuate chronic cadmium toxicity in mice gut microbiota. *Food & Function, 7*, 3524-3530. https://doi.org/10.1039/C6FO00233A

[100] Ameer, K., Shahbaz, H. M., & Kwon, J.-H. (2017). Green extraction methods for polyphenols from plant matrices and their byproducts: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 16*, 295-315. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12253

[101] Patil, P. D., Patil, S. P., Kelkar, R. K., Patil, N. P., Pise, P. V., & Nadar, S. S. (2021). Enzyme-assisted supercritical fluid extraction: An integral approach to extract bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology, 116*, 357-369. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.032

[102] Luithui, Y., Baghya Nisha, R., & Meera, M. S. (2019). Cereal by-products as an important functional ingredient: Effect of processing. *Journal of Food Science and Technology, 56*, 1-11. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3461-y