

© 2021 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 24: 1-10, 2021.

<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.300>

Estabilidad oxidativa y contenido de compuestos fenólicos durante el almacenamiento del salvado de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) extrudido

Raquel Alejandra Ortiz-Cruz¹, Benjamín Ramírez-Wong^{2*},
Dalia Isabel Sánchez-Machado², Ana Irene Ledesma-Osuna²,
Patricia Isabel Torres-Chávez², Beatriz Montaña-Leyva²
y Jaime López-Cervantes³

¹Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, ²Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro. Hermosillo 83000, Sonora, México. ³Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, Instituto Tecnológico de Sonora, Cd. Obregón 85000, Sonora, México.*E-mail: bramirez@guaymas.uson.mx

RESUMEN

El salvado de sorgo posee una alta capacidad antioxidante debido a su elevado contenido de compuestos fenólicos. Durante el decorticado del grano para la obtención del salvado, pueden presentarse reacciones de oxidación lipídica que deterioran su calidad. Para evitar esto, se emplean procesos de estabilización como la extrusión. El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios químicos en los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante del salvado de sorgo rojo extrudido. Los salvados de sorgo crudo (SC) y extrudido (SE) se almacenaron durante 42 días para poder evaluar los cambios químicos (índice de peróxidos, pH y ácidos grasos libres), en los compuestos fenólicos, su capacidad antioxidante y la presencia de ácidos fenólicos. El tipo de salvado fue el factor que más afectó los resultados de las evaluaciones químicas. La calidad del SE fue más estable en comparación con la del SC, el cual tuvo cambios significativos de ácidos grasos libres e índice de peróxidos. El contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de ambos tipos de salvado no se modificaron significativamente ($p > 0.05$) por efecto del tiempo de almacenamiento, sin embargo, el SE presentó niveles superiores en compuestos fenólicos y capacidad antioxidante que el SC. El proceso de extrusión del salvado de sorgo retarda la oxidación enzimática y mejora la extracción de los compuestos fenólicos.

Palabras clave: salvado de sorgo, extrusión, capacidad antioxidante, compuestos fenólicos, almacenamiento.

Oxidative stability and content of phenolic compounds during storage of extruded sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) bran

ABSTRACT

Sorghum bran has a high antioxidant capacity due to the high concentrations of phenolic compounds. During decortication of the sorghum grain to obtain the bran, lipid oxidation reactions may occur that cause deterioration in its quality. To avoid this, thermal stabilization processes such as extrusion are used. The objective of this work was to evaluate chemical, stability of phenolic compounds and antioxidant capacity changes of extruded red sorghum bran. Raw sorghum bran (SC) and extruded (SE) sorghum bran were stored for 42 days and chemical (peroxide index, pH, free fatty acid), phenolic compounds, antioxidant capacity and phenolic acids determinations were carried out. The type of bran was the factor that most affected results of the chemical evaluations. The SE showed greater stability in quality than the SC, which had significant changes in free fatty acid and peroxide index. The content of phenolic compounds and the antioxidant capacity of both types of bran were not modified by the effect of storage. However, the SE presented higher levels of both parameters than the SC. The sorghum bran extrusion process retards enzymatic oxidation of lipids and improves the extraction of phenolic compounds.

Keywords: sorghum bran, extrusion, antioxidant capacity, phenolic compounds, storage.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha incrementado la demanda y la necesidad por desarrollar alimentos funcionales debido a las modificaciones y necesidades dietarias, dietas libres de gluten o por la búsqueda de hábitos alimenticios saludables. Algunos cereales que han sido estudiados ampliamente por sus beneficios a la salud son el trigo, la avena y el arroz. En los últimos años se ha propuesto el uso de cereales no convencionales como el sorgo, para su uso e inclusión en la dieta humana (Rocchetti *et al.*, 2020).

El sorgo es un cereal utilizado principalmente para la alimentación animal; sin embargo, en gran parte de África y Asia es un alimento básico para el consumo humano a nivel de subsistencia (FAO, 2017). En México, la producción de sorgo en el año 2017 fue de aproximadamente 4.8 millones de toneladas ocupando el cuarto lugar en producción a nivel mundial; además, en el mismo año fue el segundo grano más producido en el país (FAOSTAT, 2019). Es un cereal rico en fitoquímicos promotores de la salud, como son los ácidos fenólicos, antocianinas, proantocianidinas y otros flavonoides. Estos compuestos se caracterizan por presentar alta capacidad antioxidante y se encuentran concentrados en las capas externas del grano, lo que se conoce como fracción de salvado (Dicko, Gruppen, Traoré, Voragen & van Berkel, 2006; Rocchetti *et al.*, 2020).

En la búsqueda de un mayor aprovechamiento de los compuestos antioxidantes, se obtiene el salvado mediante procesos como el decortinado, que consiste en la separación de las capas externas del resto del grano (endospermo) (Chen, Dunfor & Goad, 2013). Durante el proceso de decortinado o blanqueado de cereales, se llevan a cabo reacciones de oxidación lipídica, que provocan el deterioro de la calidad tanto del salvado como de los productos que de él se generan (Frankel, 1984; Malekian, 2000). Los lípidos se encuentran presentes en un 7 a 9%, incluyendo a los triacilglicéridos, ácidos grasos libres, policosanoles, aldehídos grasos, esteroides libres, ésteres de cera y ésteres de esteroides, siendo los triacilglicéridos los componentes mayoritarios (Da Silva & Taylor, 2004; Weller & Hwang, 2005). Los ácidos grasos poliinsaturados (PUFA, por sus siglas en inglés) se encuentran en mayor proporción (> 84%), porque el aceite de sorgo es más susceptible a la oxidación (Hadbaoui, Djeridane, Yousfi, Saidi & Nadjemi, 2010). Las reacciones de autooxidación son una de las causas del deterioro de los lípidos, que traen consigo características indeseables en los alimentos, como son sabores y olores desagradables (rancidez) (Moure *et al.*, 2001). Para evitar el daño por oxidación lipídica y mantener al salvado en estado óptimo, se han empleado procesos llamados de estabilización de salvado, que pueden ser métodos químicos, térmicos o enzimáticos (Prabhakar & Venkatesh, 1986). Los métodos térmicos han resultado más eficaces porque además de retrasar o impedir la oxidación lipídica, pueden mejorar

la digestibilidad proteica y la eficiencia alimentaria de los productos (Luzardo-Ocampo *et al.*, 2020).

Uno de los procesos más utilizados para la estabilización y mejora de la digestibilidad del salvado es la extrusión térmica, un proceso de cocción rápida a altas temperaturas, que logra mantener la calidad del salvado almacenado por más tiempo, en comparación con otros métodos de estabilización (Porta, 1993). Diversos autores han reportado que el tratamiento de extrusión térmica reduce la actividad de las enzimas lipolíticas, retardando la liberación de los ácidos grasos, el incremento de la acidez, y por lo tanto extendiendo la vida de anaquel en harinas de sorgo (Meera, Bhashyam & Ali, 2011), harinas de mijo (Nantanga, Seetharaman, Kock & Taylor, 2008) y avena (Lehtinen, Kiiliäinen, Lehtomäki & Laakso, 2003). Sharma, Kaur, Dar & Singh (2014) procesaron el salvado de diferentes cereales (trigo, avena, arroz y cebada) por métodos térmicos como calentamiento húmedo, calentamiento en seco, microondas y extrusión para almacenarlos por seis meses. Los autores reportaron que, entre los métodos evaluados, la extrusión fue el proceso de estabilización más eficaz.

Además de estos beneficios, el proceso de extrusión puede promover la liberación de compuestos fenólicos, que se encuentran principalmente ligados por enlaces éster a la matriz alimentaria y de esta forma potencian las propiedades bioactivas de los compuestos, como la actividad antioxidante (Zielinski, Kozłowska & Lewczuk, 2001, Wang, He & Chen, 2014). Algunos autores han reportado los efectos del proceso de extrusión sobre el contenido de los compuestos fenólicos en cereales. Ti *et al.*, (2015) observaron un incremento del 17 % en el contenido de compuestos fenólicos totales de arroz extrudido. Ramos- Enríquez *et al.*, (2018) obtuvieron salvado de trigo extrudido a 140 y 180 °C reportando un incremento en el contenido de compuestos fenólicos ligados y totales. Ortiz-Cruz *et al.*, (2020) observaron también un incremento en el contenido de compuestos fenólicos libres en salvado de sorgo extrudido a 160 °C y humedad de alimentación del 30 %. Estos autores, sugieren que el incremento en la concentración de compuestos fenólicos se debe al proceso de extrusión, que puede promover la liberación de los mismos con potencial antioxidante.

El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios químicos, contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante del salvado sorgo rojo extrudido, y determinar su estabilidad oxidativa a diferentes tiempos de almacenamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

El sorgo rojo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) utilizado en el estudio se obtuvo de la cosecha 2016 de Los Mochis, Sinaloa, México. Los granos de sorgo se limpiaron manualmente, eliminando todo tipo de impurezas y posteriormente se

almacenaron en bolsas negras de polietileno, a temperatura de refrigeración y en completa oscuridad hasta su uso. La composición química del grano de sorgo se determinó siguiendo los métodos aprobados internacionalmente por la AACC (2000). El reactivo de Folin-Ciocalteu se obtuvo de Merck, Darmstadt, Germany; el radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo), el Trolox y los estándares de ácido cafeico, ácido ferúlico y ácido *p*-cumárico se adquirieron de Sigma-Aldrich, St. Louis, MO. Los solventes fueron grado HPLC (metanol, acetonitrilo, ácido trifluoroacético y agua). Los demás reactivos químicos fueron grado analítico (JT Baker Deventer, The Netherlands).

Obtención del Salvado

La obtención del salvado de sorgo se realizó de acuerdo al procedimiento reportado por Ortiz-Cruz *et al.* (2020). En un corto lapso de tiempo los lotes de 2 kg de grano se sometieron al proceso de molienda abrasiva durante 65 s, utilizando un mini decorticador tipo PRL (Laboratorio Prairie Regional, Nutana Machine Co., Saskatoon, Canadá). La fracción del salvado fue molida en un molino de mortero (Retsch RM 200, Haan, Alemania) y se pasó a través de una malla de 0.5 mm.

Proceso de Extrusión del Salvado de Sorgo

El acondicionamiento del salvado de sorgo, extrusión, secado y molienda se llevaron a cabo siguiendo la metodología reportada por Ortiz-Cruz *et al.*, (2020). A continuación, se describirán brevemente cada una de las etapas del proceso.

Acondicionamiento. El salvado de sorgo se homogenizó en una mezcladora (Kitchen Aid, Modelo MK45SSWH, St. Joseph, Michigan, USA) durante 5 min a 1,250 rpm. Durante el mezclado se acondicionó a 30% de humedad (p/p) con agua destilada. Posteriormente se almacenó en una bolsa de polietileno a 4 °C en oscuridad, durante 12 horas.

Proceso de Extrusión. Con el salvado de sorgo acondicionado se alimentó al extrusor bajo las siguientes condiciones: tornillo número 2 (relación de compresión nominal 2:1); velocidad del tornillo de 100 rpm; velocidad de alimentación de la tolva de 50 rpm; y diámetro de apertura del dado de 3 mm. El proceso se llevó a cabo en un extrusor de un solo tornillo (Brabender Instruments, Modelo E19/25 D, OHG, Duisburg, Alemania) con cuatro zonas de calentamiento. Las temperaturas dentro del barril fueron de 60, 80, 110 y 160 °C, respectivamente. Estas condiciones del proceso fueron las óptimas para obtener salvado extrudido con la máxima concentración de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante (Ortiz-Cruz *et al.*, 2020).

Secado y Molienda. El salvado de sorgo extrudido se enfrió a temperatura ambiente de (25 °C), y se secó a 60 °C durante 30 min en un secador de túnel. Una vez seco, se molió en un

molino de mortero (Retsch RM 200, Haan, Alemania) hasta pasar a través de una malla de 0.5 mm.

Estabilidad oxidativa del Salvado de Sorgo Extrudido

Ocho lotes de 100 g de salvado de sorgo extrudido (SE) y sin extrudir o crudo (SC) se empacaron en bolsas de papel Kraft de 7 x 13 cm. Las bolsas conteniendo el salvado de sorgo se almacenaron durante 42 días a 25 °C en oscuridad dentro de una incubadora, con el fin de mantenerlas aisladas de corrientes de aire. Cada 21 días se tomaron muestras de los dos tipos de salvado de sorgo, con el propósito de hacer evaluaciones químicas, de los compuestos fenólicos y su capacidad antioxidante.

Evaluaciones Químicas

Desgrasado de las Muestras. Los lípidos de los dos tipos de salvado de sorgo almacenado se obtuvieron mediante reflujo con hexano, en agitación durante 5 h. Los extractos se filtraron para eliminar la fracción harinosa y el disolvente se evaporó para la obtención de los lípidos, los cuales inmediatamente se colocaron en viales ámbar a 4 °C. Las fracciones desgrasadas (harinosa) se almacenaron a -20 °C para la obtención de extractos metanólicos.

Acidez Titulable. Se llevó a cabo utilizando el método Ca 5a-40 de la AOCS (1989) con algunas modificaciones. Se mezclaron 0.1 g de aceite, 0.5 mL de alcohol etílico al 95 % y 3 gotas de fenoltaleína para titular con una solución de NaOH al 0.1 N.

pH. Se determinó en las muestras de ambos tipos de salvado de sorgo utilizando el método 02-52 de la AACC (2000). A 10 g de muestra se le agregaron 100 mL de agua recientemente hervida y a temperatura ambiente, se agitó por 10 minutos hasta lograr su completa homogeneización. Después de 15 min de reposo, se decantó el sobrenadante y se le determinó el pH con un potenciómetro (HANNA Instruments, modelo HI110).

Ácidos Grasos Libres. Se llevó a cabo en muestras de ambos tipos de salvado de sorgo siguiendo el método Ca 5a-40 de la AOCS (1989) con modificaciones. Se pesaron 0.1 g de muestra y se adicionó 0.5 mL de alcohol etílico al 95 % neutralizado con álcali y 3 gotas de fenoltaleína. Se tituló con una solución de NaOH al 0.1 N. El resultado fue que el porcentaje de ácidos grasos libres fue calculado como ácido oleico (%).

Índice de Peróxidos. A las muestras de ambos tipos de salvado de sorgo se les determinó el índice de peróxidos siguiendo el método Cd 8-53 de la AOCS (1989) con modificaciones. Se pesaron 0.2 g de aceite y se añadió 30 µL de KI y 1.2 mL de solución de ácido acético/cloroformo; se agitó vigorosamente por 1 min. Se adicionaron 1.2 mL de agua y 3 gotas de almidón, para titular con una solución de tiosulfato de sodio

al 0.01 N. Los resultados se reportaron como meq de peróxido por kg de muestra.

Perfil de Ácidos Grasos

Los ácidos grasos (AG) fueron determinados por cromatografía de gases, cuantificados en ambos tipos de sorgo en forma de metilésteres (FAMES). Los ácidos grasos se metilaron siguiendo el procedimiento de Sánchez-Machado *et al.* (2004), con modificaciones. Específicamente se pesaron 200 mg de salvado de sorgo en un tubo con rosca, se adicionaron 2 mL de tolueno y 3 mL de HCl metanólico al 5% recién preparado. Esta mezcla se agitó en el vórtex y se calentó por 2 horas a 70 °C en baño de agua. Después se enfrió a temperatura ambiente, y se añadieron 3 mL de K₂CO₃ al 6% y 2 mL de tolueno, seguido de agitación en el vórtex. La mezcla se centrifugó a 2,400 rpm por 5 minutos, después se separó la fase orgánica (superior) y se secó con Na₂SO₄ anhidro. El cromatógrafo de gases (VARIAN 3800) está equipado con un detector de ionización de flama (FID) y una columna capilar CP-Sil 88 (100 m x 0.25 mm, Agilent). Las condiciones de operación fueron: volumen de inyección, 6.0 µL; temperatura del inyector, 250 °C; gas portador, helio; y temperatura del detector, 260 °C. El gradiente de temperatura en el horno de la columna inicio en 100 °C por 5 minutos, seguido por incrementos de 4 °C/min hasta 240 °C, permaneciendo así por 30 min. Los picos individuales de los ácidos grasos se identificaron por comparación de los tiempos de retención de los AG del estándar de referencia (Supelco 37). La abundancia relativa de cada AG se estima en proporción al área del pico identificado.

Contenido de Compuestos Fenólicos y Capacidad Antioxidante

Extracción de compuestos fenólicos libres y unidos. Se mezcló 1 g de cada tipo de salvado (molido y desgrasado) con 15 mL de metanol acuoso al 80%, se sonicó (Branson Ultrasonics, Model: 5800, U. S.) durante 1 h y se centrifugó (Thermo Scientific™ Sorvall™ Stratos, U.S.) a 3,000 g durante 15 min. Los sobrenadantes se separaron y los residuos se extrajeron dos veces. Las muestras se filtraron y se evaporaron a sequedad en un evaporador rotatorio (BÜCHI Labortechnik, AG) a 40 °C. Posteriormente, los extractos se disolvieron en 5 mL de metanol al 50%. Los residuos de esta extracción se utilizaron para la obtención de los extractos metanólicos de compuestos fenólicos unidos. Enseguida 100 mg del residuo se mezcló con 15 mL de NaOH 2 N y se sonicó por 3 h, se ajustó el pH de 1.5–2 y se le agregó el doble del volumen de acetato de etilo, se agitó vigorosamente por 2 min y se centrifugó. Los sobrenadantes se separaron y los residuos se extrajeron dos veces más. Las muestras se evaporaron a sequedad en un evaporador rotatorio a 40 °C. Posteriormente los extractos se disolvieron en 5 mL de metanol al 50% (Awika, Rooney, Wu, Prior & Cisneros-Zevallos, 2003).

Contenido de Compuestos Fenólicos. El contenido de compuestos fenólicos se determinó en los extractos de fenoles libres y unidos de los dos tipos de sorgo. Se mezclaron 150 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu con 120 µL de carbonato de sodio 7 % y 5 µL de muestra y se incubó por 1 h. La absorbancia fue leída a 765 nm (xMark Microplate Spectrophotometer System, US). El estándar utilizado fue ácido gálico, y los resultados se expresaron en microgramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra (µgEAG/g) (Kaluza, McGrath, Roberts & Schoeder, 1980).

Actividad secuestrante del radical DPPH. El ensayo DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) se basa en una reacción colorimétrica en la que el radical estable DPPH pierde su color al ser reducido por acción de un antioxidante. Describimos brevemente, que el ensayo consistió en disolver 2.5 mg de radical DPPH en 100 mL de metanol, se ajustó la solución a una absorbancia de 0.7±0.2. Enseguida a 280 µL de solución del radical se le agregaron 20 µL de cada una de las muestras. Después de 30 min a temperatura ambiente y en obscuridad se leyó la absorbancia de cada una de las muestras contra blanco reactivo (Brand-Williams, Cuvelier & Berset, 1995). Esto se midió con un espectrofotómetro de UV visible (xMark Microplate Spectrophotometer System, US) a 515 nm. Los resultados se expresaron en micro moles equivalentes de Trolox por gramo de muestra (µmoleT/g).

Identificación de los Ácidos Cafeico, *p*-Cumárico y Ferúlico

Los ácidos fenólicos fueron cuantificados con un equipo de HPLC-DAD (Agilent 1,200, Santa Clara, CA), usando una columna de fase reversa Zorbax Eclipse Plus C18, 4.6 mm x 100 mm (3.5 µm), de acuerdo con la metodología descrita por Ayala-Soto, Serna-Saldívar, García-Lara & Pérez-Carrillo (2014), con modificaciones. Las condiciones de operación fueron: volumen de inyección, 5.0 µL, temperatura de la columna de 30 °C. El gradiente de elución escalonado se realizó con agua acidificada con ácido trifluoroacético a pH 2 (A) y acetonitrilo (B) de la siguiente manera: a los 0 min 15 % B; a los 10 min 35 % B; a los 11 min 55 % B, a una velocidad de flujo de 0.6 mL/min; a los 12 min 75 % B con velocidad de flujo de 0.8 mL/min; a los 13 min 100 % B con velocidad de flujo de 1.0 mL/min, a 25 °C. La identificación de los picos de los ácidos ferúlico, *p*-cumárico y cafeico se basó en el tiempo de retención de los estándares.

Diseño de Experimentos y Análisis Estadístico

Se utilizó un diseño de experimento factorial de 3x2. Los factores fueron: tiempo de almacenamiento con 3 niveles (0, 21 o 42 días) y tipo de salvado con 2 niveles (SC ó SE). A todos los datos hasta aquí citados se les realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de confiabilidad del 95%. Para observar diferencias entre medias de tratamientos específicos se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 95%. El análisis estadístico se llevó a cabo

con el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis químico del Grano de Sorgo

El análisis químico del contenido del grano de sorgo arrojó los siguientes resultados: humedad 3.05%, cenizas (base seca) 1.62%, grasa cruda (base seca) 4.0%, proteínas 11.69% (base seca). y el contenido de humedad del salvado de sorgo 7.26%.

Perfil de Ácidos Grasos del Salvado de Sorgo

El contenido de grasa en el salvado de sorgo crudo fue de 7.24%. El análisis de varianza no muestra diferencias significativas en el contenido de grasa con respecto al tipo de salvado (SC o SE). En la Tabla I se presentan los ácidos grasos encontrados en el salvado de sorgo crudo y en el salvado de sorgo extrudido. Los ácidos grasos poliinsaturados se encontraron en mayor concentración, con un 22%, siendo el ácido linoleico (18:2n6) el predominante en este grupo al presentar un (45%). Los ácidos grasos monoinsaturados representan un 17%, donde el más abundante es el ácido oleico (18:1) con 34%. Dentro del grupo de los ácidos grasos saturados (2.2%), el ácido palmítico (16:0) se encuentra en un 15%.

Altas concentraciones de ácidos grasos poliinsaturados se asocian con la pérdida de la calidad del salvado y un menor tiempo de almacenamiento. Esto debido a que el grupo de ácidos grasos son más susceptibles a las reacciones de autooxidación causantes del deterioro de los lípidos, que dan lugar, como ya se mencionó, a características indeseables en los alimentos, como son sabores y olores desagradables (rancidez) (Moure *et al.*, 2001). Por esta razón, se han propuesto diversos métodos de estabilización para mantener al salvado en estado óptimo.

Estabilidad del Salvado de Sorgo Almacenado

De acuerdo con el análisis de varianza, el tipo de salvado fue el factor que más afectó a la acidez y el pH, seguido por el tiempo de almacenamiento y la interacción de ambos factores.

En la Tabla II se presenta el resultado de los valores de acidez y pH obtenidos en diferentes períodos de tiempo de almacenamiento del salvado de sorgo (salvado de sorgo crudo (SC) y salvado de sorgo extrudido (SE)).

Acidez Titulable. En la Tabla II se observa un incremento significativo ($p < 0.05$) en la acidez titulable del SC, de 0.018% (día 0) a 0.02 % (día 42), mientras que en el SE no se presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) por el período de tiempo de almacenamiento. Esto puede deberse a que en el SC aún siguen activas las enzimas lipolíticas como la lipasa,

Tabla I. Perfil de ácidos grasos (% del total) encontrados en salvado de sorgo crudo y salvado de sorgo extrudido.

Ácido graso	Tratamiento	
	Salvado crudo	Salvado extrudido
C13:0	0.12 ± 0.00	0.18 ± 0.09
C14:0	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.02
C15:0	0.04 ± 0.01	-
C16:0	15.38 ± 0.01	15.99 ± 0.42
C16:1	0.45 ± 0.01	0.46 ± 0.02
C17:0	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00
C18:0	1.51 ± 0.11	1.40 ± 0.03
C18:1n9 c	34.77 ± 0.01	34.10 ± 0.36
C18: 2n6 c	44.74 ± 0.12	45.25 ± 0.25
C20:0	0.27 ± 0.01	0.23 ± 0.01
C18:3n6	0.16 ± 0.02	0.09 ± 0.04
C20:1n9	0.20 ± 0.01	0.19 ± 0.00
C18:3n3, C21:0	1.36 ± 0.02	1.21 ± 0.02
C22:0	0.14 ± 0.01	0.29 ± 0.06
C20:3n3, C20:4n6	nd	0.19 ± 0.11
C24:0	nd	nd
C24:1n9	nd	nd
C22:6n3	0.71 ± 0.05	0.32 ± 0.21

Los valores son la media de dos repeticiones ± la desviación estándar. Nd: no detectado.

Tabla II. Cambios de acidez y pH en diferentes períodos de tiempo de almacenamiento del salvado de sorgo extrudido (SE) y salvado de sorgo control (SC).

Almacenamiento (Días)	Tipo de Salvado	Acidez (%)	pH
0	SC	0.018 ± 0.0003 ^{ab}	6.53 ± 0.01 ^{aa}
	SE	0.017 ± 0.0009 ^{ab}	6.40 ± 0.01 ^{cc}
21	SC	0.017 ± 0.0003 ^{ab}	6.41 ± 0.04 ^{bc}
	SE	0.016 ± 0.0006 ^b	6.47 ± 0.01 ^{abc}
42	SC	0.020 ± 0.0012 ^a	6.41 ± 0.04 ^{bc}
	SE	0.019 ± 0.0006 ^a	6.49 ± 0.01 ^{ab}

Los valores son la media de tres repeticiones ± la desviación estándar. Letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

que hidroliza a los triacilgliceroles para producir glicerol y ácidos grasos libres, lo que puede reflejarse en el aumento de la acidez (Malekian, 2000), o bien que el método no es lo suficientemente sensible para detectar las diferencias.

pH. EL incremento o decremento del pH se asocia con la concentración de AGL, que al incrementarse disminuye el pH de la muestra. En la Tabla II se presenta el pH del SE y SC en diferentes períodos de tiempo de almacenamiento. Se observa que hubo diferencias significativas tanto por el tiempo de almacenamiento como por el tipo de sorgo. El rango del pH fue de 6.4-6.53. La tendencia de los valores del pH disminuyeron con el período de tiempo de almacenamiento para ambos tipos de salvado de sorgo.

Ácidos Grasos Libres. El porcentaje de ácidos grasos libres (AGL) es un indicador de la rancidez del salvado. El Análisis de varianza indicó que los AGL fueron afectados significativamente ($p < 0.05$) por el tipo de salvado, el tiempo de almacenamiento y la interacción de ambos factores.

En la Figura 1 se presenta el efecto del tipo de salvado y el tiempo de almacenamiento sobre los AGL. Se observa que, en el SC, los AGL incrementan significativamente de 2.70% en el día 0 a 6.32% a los 42 días, mientras que en el SE permanecen constantes con el almacenamiento. Este porcentaje de AGL se asocia con el incremento en el índice de acidez del día 42 del estudio (Tabla II). Se ha reportado que el sorgo puede ser almacenado por largos periodos de tiempo cuando el grano permanece intacto. Una vez decorticado, se libera la enzima lipasa, que degrada a los triacilglicéridos, lo que resulta en un aumento de los ácidos grasos libres en un período de almacenamiento corto, afectando las propiedades fisicoquímicas del salvado (Zhang & Hamaker, 2005).

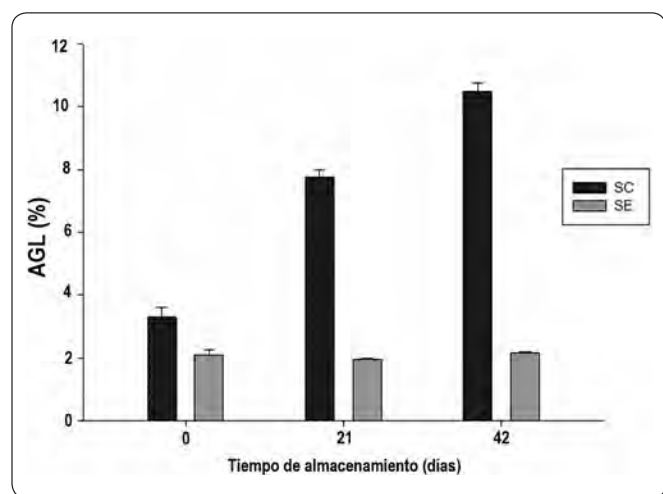


Figura 1. Efecto del período de tiempo de almacenamiento y el tipo de salvado de sorgo (SE y SC) sobre el contenido de AGL. Las barras indican desviación estándar. Elaboración propia.

El contenido de AGL en el SE permanece constante durante el tiempo de almacenamiento, esto puede deberse al proceso de estabilización térmica al que fue sometido por el proceso de extrusión, el cual inhibe la acción de las enzimas lipolíticas. Sin embargo, en el SC al no ser sometido a ningún proceso térmico, los ácidos grasos de los triacilglicéridos son susceptibles a la acción enzimática y por esa razón probablemente se incrementa el contenido de AGL y también la acidez (Frankel, 1984; Porta, 1993; Malekian, 2000).

Índice de Peróxidos. El índice de peróxidos es un indicador del contenido de hidroperóxidos generados durante las primeras etapas de rancidez oxidativa del salvado. Según la Norma para Grasas y Aceites Comestibles no Regulados por Normas Individuales (*Codex Alimentarius*, 1981), el valor del índice de peróxidos aceptable para aceites y grasas es hasta de 10 meq/kg.

El índice de peróxidos fue afectado significativamente por el tipo de salvado, el tiempo de almacenamiento y la interacción de ambos factores. En la Figura 2 se presenta el efecto del tipo de salvado y el tiempo de almacenamiento sobre el índice de peróxidos. El SC presentó un incremento significativo en el índice de peróxidos durante el tiempo de almacenamiento iniciando con 7.9 y finalizando en 12.3 meq/kg, mientras que en el SE no se observaron cambios significativos con el tiempo de almacenamiento, manteniendo los valores de índice de peróxidos dentro de los límites aceptables. En el SE el que no haya cambiado el índice de peróxidos se puede atribuir al proceso de extrusión, que debido a las altas temperaturas inactivó a las enzimas causantes de la degradación lipídica (Porta, 1993).

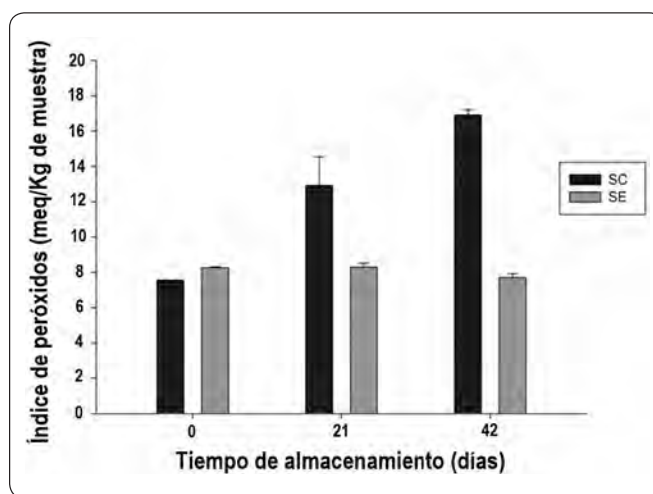


Figura 2. Efecto del período de tiempo de almacenamiento y el tipo de salvado de sorgo (SE y SC) sobre el índice de peróxidos. Las barras indican desviación estándar. Elaboración propia.

Es importante resaltar que hay otros factores que pudieran afectar la estabilidad oxidativa del salvado, como es el alto contenido de antioxidantes al ejercer su efecto retardando la oxidación, así como la luz, la humedad y la actividad del agua, que también afectarían la estabilidad lipídica, sin embargo, son determinaciones que no se consideraron en este estudio y podrían ser parte de investigaciones posteriores.

Efecto del Tiempo de Almacenamiento sobre los Compuestos Fenólicos y la Capacidad Antioxidante

El salvado de sorgo se caracteriza por tener altas concentraciones de compuestos antioxidantes, como los ácidos fenólicos. El análisis de varianza revela que el tipo de salvado fue el factor que más afectó el contenido de los compuestos fenólicos y su capacidad antioxidante.

En la Tabla III se presentan el efecto del tiempo de almacenamiento sobre el contenido de los compuestos fenólicos del salvado de sorgo crudo y extrudido. No se observan cambios significativos en los compuestos fenólicos por efecto del tiempo de almacenamiento, sin embargo, en el SE se muestra un mayor contenido de compuestos fenólicos. Esto puede deberse a que el proceso de extrusión promueve la liberación de compuestos de la matriz celular, haciéndolos más accesibles para su cuantificación en comparación con el SC. El contenido de compuestos fenólicos del salvado de sorgo extrudido evaluado en este estudio varía entre 24,106.92 y 28,314.81 µg EAG/g, siendo semejante a lo reportado por Salazar *et al.*, (2016) para salvado de sorgo extrudido.

En la Tabla III se muestra el efecto del almacenamiento en la capacidad antioxidante del salvado de sorgo crudo y salvado extrudido. No hubo diferencias significativas en DPPH-FL y DPPH-FU durante el tiempo de almacenamiento teniendo valores dentro del rango de 11.25-14.57 µmol ET/g y 33.14-43.87 µmol ET/g, respectivamente. Sin embargo, en DPPH-FT del salvado extrudido se presentaron diferencias significativas en el día 21 con el valor más alto (60.56 µmol ET/g) y al final del estudio se observó una disminución de la capacidad antioxidante total del salvado crudo. La capacidad antioxidante total del salvado de sorgo extrudido varió entre 48.66 y 60.56 µmol ET/g, valores superiores en comparación con los reportados por Salazar *et al.*, (2016) (12.44 µmol ET/g).

Hu, Wang & Li (2018) estabilizaron al salvado de trigo con vapor sobrecalentado, sin reportar diferencias significativas en el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante, lo que concuerda con los resultados obtenidos en el presente estudio. Sin embargo, algunos autores han reportado modificaciones en el contenido de los compuestos fenólicos de cereales que se han sometido a procesos térmicos y que han sido almacenados hasta por seis meses. Como es el caso de Bergonio, Lucatin, Corpuz, Ramos & Duldulao (2016), que estabilizaron el salvado de arroz con calentamiento seco, calentamiento húmedo y microondas, sin observar cambios en los compuestos fenólicos durante los primeros 2 meses de almacenamiento y en el caso de la capacidad antioxidante, reportaron un incremento a lo largo de los 6 meses de almacenamiento, atribuyendo este

Tabla III. Cambios en el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante en salvado de sorgo extrudido y salvado de sorgo crudo en diferentes períodos de tiempo de almacenamiento.

Almacenamiento (Días)	Tipo de Salvado	FL	FU	FT	DPPH-FL	DPPH-FU	DPPH-FT
		µg EAG/g			µmol ET/g		
0	SC	6812.42 ± 43.70 ^{ab}	19650.80 ± 0.00 ^{bc}	26463.23 ± 43.70 ^b	12.16 ± 0.35 ^{ab}	43.87 ± 2.04 ^a	56.03 ± 1.70 ^{ab}
	SE	7489.72 ± 88.13 ^a	20825.09 ± 43.70 ^{ab}	28314.81 ± 131.84 ^a	14.57 ± 0.39 ^a	40.84 ± 1.86 ^{ab}	49.75 ± 0.50 ^{ab}
21	SC	6070.77 ± 371.47 ^b	18847.34 ± 43.70 ^c	24918.11 ± 415.17 ^c	11.99 ± 1.22 ^b	38.96 ± 2.39 ^{ab}	50.11 ± 2.30 ^{ab}
	SE	6580.66 ± 327.77 ^{ab}	21319.53 ± 349.62 ^a	27900.19 ± 21.85 ^a	13.61 ± 0.30 ^{ab}	42.16 ± 1.59 ^{ab}	60.56 ± 1.53 ^a
42	SC	6866.50 ± 32.78 ^a	17240.42 ± 742.92 ^d	24106.92 ± 710.17 ^c	12.31 ± 0.45 ^{ab}	33.14 ± 4.25 ^b	45.37 ± 2.01 ^b
	SE	6812.42 ± 43.70 ^{ab}	19619.90 ± 437.03 ^{bc}	26432.32 ± 393.32 ^b	11.25 ± 0.67 ^b	41.22 ± 1.86 ^{ab}	48.66 ± 0.42 ^{ab}

Los valores son la media de tres repeticiones ± la desviación estándar. SC: Salvado crudo; SE: salvado extrudido, FL: fenoles libres, FU: fenoles unidos, FT: fenoles totales, DPPH-FL: capacidad antioxidante de fenoles libres, DPPH-FU: capacidad antioxidante de fenoles unidos, DPPH-FT: capacidad antioxidante de fenoles totales. Letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas (p < 0.05).

comportamiento a la liberación de compuestos fenólicos unidos por posibles reacciones enzimáticas y no enzimáticas, generando compuestos fenólicos libres. Dar, Sharma & Nayik, (2016) evaluaron la estabilidad de los compuestos fenólicos de las botanas adicionadas con salvado de trigo, arroz y avena almacenadas por seis meses, reportando una disminución constante del contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante durante el tiempo de almacenamiento, siendo más prominente durante los tres meses finales del estudio, atribuyendo estos cambios probablemente a la dilución de los compuestos por aumento de la humedad y a la oxidación de los mismos durante el almacenamiento.

El comportamiento de los compuestos fenólicos durante el tiempo de almacenamiento del presente estudio es el esperado y además favorable, pues se ha reportado que pueden aportar actividad antioxidante, eliminando radicales libres o actuando como quelantes de iones metálicos (promoviendo la oxidación de los lípidos), al mejorar con esto la vida de anaquel del producto (Brennan, Brennan, Derbyshire & Tiwari, 2011).

Identificación y Caracterización de los Ácidos Cafeico, *p*-Cumárico y Ferúlico

Se llevó a cabo la identificación y cuantificación de los ácidos cafeico, *p*-cumárico y ferúlico en los extractos de fenoles libres (FL) y fenoles unidos (FU) de los dos tipos de salvados, mediante la técnica de HPLC. De acuerdo con el análisis de varianza el factor que afectó el contenido de ácidos fenólicos fue el tipo de salvado.

La Tabla IV muestra el efecto del tiempo de almacenamiento sobre el contenido de los ácidos fenólicos del salvado de sorgo

crudo y del salvado extrudido. No se observaron diferencias significativas en la concentración de los compuestos por efecto del almacenamiento. En general, los ácidos fenólicos analizados se encuentran en mayor concentración en la fracción unida (FU), y esto es de esperarse pues se sabe que los ácidos fenólicos se encuentran principalmente ligados a la pared celular (Acosta-Estrada, Gutiérrez-Urbe & Serna-Saldívar, 2014). En la fracción libre (FL) del salvado de sorgo crudo, los ácidos que predominan son el ácido cafeico y *p*-cumárico y en el caso del salvado de sorgo extrudido el compuesto predominante es el ácido ferúlico que presenta una mayor concentración en comparación con el salvado crudo. Además, se puede observar que el salvado de sorgo extrudido tiende a presentar una mayor concentración de los compuestos en comparación con el salvado crudo. Este comportamiento se le puede atribuir al proceso de extrusión, ya que se ha reportado que puede romper los enlaces covalentes de polifenoles de alto peso molecular y además cortar matrices de la pared celular, lo que mejora la accesibilidad de los compuestos fenólicos (Wang *et al.*, 2014). Además, se ha reportado que, del total de ácidos fenólicos, el ácido ferúlico se encuentra presente entre 24-47% (Dykes & Rooney 2007; Awika & Rooney 2004).

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Zielinski *et al.*, (2001) quienes reportaron un incremento en el ácido ferúlico y cumárico presentes en trigo, avena, y centeno, atribuyendo esto al proceso de extrusión térmica.

CONCLUSIONES

El salvado de sorgo extrudido, en calidad, tuvo mayor estabilidad en comparación con el salvado de sorgo crudo, ya que no presentó cambios químicos que indicaran un deterioro durante el tiempo de almacenamiento. No se presentaron

Tabla IV. Cambios en el contenido de ácidos fenólicos presentes en las fracciones de fenoles libres y unidos en el salvado de sorgo extrudido y el salvado de sorgo crudo en diferentes períodos de tiempo de almacenamiento, expresado en µg/g de muestra.

Almacenamiento (Días)	Muestra	FL			FU		
		Cafeico	Cumárico	Ferúlico	Cafeico	Cumárico	Ferúlico
0	SC	10.83 ± 0.70 ^a	12.44 ± 0.56 ^a	6.32 ± 0.42 ^b	71.70 ± 6.51 ^a	158.16 ± 2.53 ^a	1714.94 ± 150.39 ^a
	SE	15.30 ± 0.69 ^a	16.85 ± 0.93 ^a	17.52 ± 0.65 ^a	94.18 ± 30.70 ^a	186.34 ± 0.68 ^a	1895.29 ± 103.57 ^a
21	SC	12.13 ± 1.19 ^a	13.52 ± 1.56 ^a	7.49 ± 1.00 ^b	77.34 ± 10.72 ^a	171.24 ± 7.88 ^a	1803.66 ± 94.71 ^a
	SE	14.77 ± 1.99 ^a	17.03 ± 2.42 ^a	17.52 ± 2.49 ^a	120.88 ± 50.93 ^a	198.81 ± 24.79 ^a	2132.46 ± 458.66 ^a
42	SC	11.36 ± 0.57 ^a	11.88 ± 0.60 ^a	7.20 ± 0.44 ^b	54.00 ± 2.79 ^a	169.85 ± 27.54 ^a	1797.85 ± 414.19 ^a
	SE	14.60 ± 1.13 ^a	16.58 ± 1.11 ^a	17.35 ± 1.36 ^a	101.15 ± 30.59 ^a	180.66 ± 37.41 ^a	2012.14 ± 446.81 ^a

FL: fenoles libres; FU: fenoles unidos. Los valores son la media de tres repeticiones ± la desviación estándar. Letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas (p < 0.05).

cambios en el contenido de los compuestos fenólicos, la capacidad antioxidante ni en el contenido de ácidos fenólicos del salvado por efecto del tiempo de almacenamiento. Sin embargo, la concentración de ácidos fenólicos fue mayor en el salvado de sorgo extrudido en comparación con el salvado sin extrudir, esto como consecuencia de la liberación de los compuestos fenólicos por el proceso de extrusión. Los resultados de este estudio demuestran que el proceso de extrusión puede estabilizar al salvado de sorgo y además potenciar su capacidad antioxidante, convirtiendo al salvado de sorgo en una buena fuente de compuestos benéficos para la salud.

AGRADECIMIENTOS

Raquel Alejandra Ortiz-Cruz agradece a CONACYT la beca otorgada para sus estudios de doctorado. Los autores desean agradecer al M.C. Ignacio Morales-Rosas por su ayuda en la realización de los experimentos de extrusión.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no hay conflictos de interés.

REFERENCIAS

- Acosta-Estrada, B. A., Gutiérrez-Urbe, J. A. & Serna-Saldívar, S. O. (2014). Bound phenolics in foods, a review. *Food chemistry*, **152**, 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.093>
- American Association of Cereal Chemists (2000). Approved Methods of the AACC, 10th Ed. Method 46-13. The Association: St. Paul, MN.
- American Oil Chemists' Society (1989). Approved Method of the AOCS, 6th Ed. Methods Ca 5a-40, Cd 8-53. USA.
- Awika, J. M. & Rooney, L. W. (2004). Sorghum phytochemicals and their potential impact on <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.04.001>
- Awika, J. M., Rooney, L. W., Wu, X., Prior, R. L. & Cisneros-Zevallos, L. (2003). Screening methods to measure antioxidant activity of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products. *Journal of agricultural and food chemistry*, **51(23)**, 6657-6662. <https://doi.org/10.1021/jf034790i>
- Ayala-Soto, F. E., Serna-Saldívar, S. O., García-Lara, S. & Pérez-Carrillo, E. (2014). Hydroxycinnamic acids, sugar composition and antioxidant capacity of arabinoxylans extracted from different maize fiber sources. *Food hydrocolloids*, **35**, 471-475. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.004>
- Bergonio, K. B., Lucatin, L. G. G., Corpuz, G. A., Ramos, N. C., & Duldulao, J. B. A. (2016). Improved shelf life of brown rice by heat and microwave treatment. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, **5(4)**, 378-385. <http://doi.org/10.15414/jmbfs.2016.5.4.378-385>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E. & Berset, C. L. W. T. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology*, **28(1)**, 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Brennan, C., Brennan, M., Derbyshire, E. & Tiwari, B. K. (2011). Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. *Trends in Food Science & Technology*, **22(10)**, 570-575. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.05.007>
- Chen, Y., Dunford, N. T. & Goad, C. (2013). Phytochemical composition of extracts from wheat grain fractions obtained by tangential abrasive dehulling. *LWT-Food Science and Technology*, **54(2)**, 353-359. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.07.007>
- Codex Alimentarius. (1981). Norma para Grasas y Aceites Comestibles no Regulados por Normas Individuales. *Codex Stan 19-1981*, 1-5.
- Da Silva, L. S. & Taylor, J. R. (2004). Sorghum bran as a potential source of kafirin. *Cereal chemistry*, **81(3)**, 322-327. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.3.322>
- Dar, B. N., Sharma, S. & Nayik, G. A. (2016). Effect of storage period on physiochemical, total phenolic content and antioxidant properties of bran enriched snacks. *Journal of Food Measurement and Characterization*, **10(4)**, 755-761. <http://doi.org/10.1007/s11694-016-9360-x>
- Dicko, M. H., Gruppen, H., Traoré, A. S., Voragen, A. G. & van Berkel, W. J. (2006). Sorghum grain as human food in Africa: relevance of content of starch and amylase activities. *African journal of biotechnology*, **5(5)**, 384-395. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9360-x>
- Dykes, L. & Rooney, L. W. (2007). Phenolic compounds in cereal grains and their health benefits. *Cereal foods world*, **52(3)**, 105-111. <https://doi.org/10.1094/CFW-52-3-0105>
- FAO (2017). FAOSTAT. Retrieved December 16, 2019, from World Crops Website: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Frankel, E. N. (1984). Lipid oxidation: mechanisms, products and biological significance. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **61(12)**, 1908-1917. <https://doi.org/10.1007/BF02540830>
- Hadbaoui, Z., Djeridane, A., Yousfi, M., Saidi, M. & Nadjemi, B. (2010). Fatty acid, tocopherol composition and the antioxidant activity of the lipid extract from the sorghum grains growing in Algeria. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, **3(3)**, 215-220. <https://doi.org/10.1007/s12349-010-0018-7>
- Hu, Y., Wang, L. & Li, Z. (2018). Superheated steam treatment on wheat bran: Enzymes inactivation and nutritional attributes retention. *LWT*, **91**, 446-452. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.086>
- Kaluza, W. Z., McGrath, R. M., Roberts, T. C. & Schroeder, H. H. (1980). Separation of phenolics of *Sorghum bicolor* (L.) Moench grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **28(6)**, 1191-1196. <https://doi.org/10.1021/jf60232a039>

- Lehtinen, P., Kiiliäinen, K., Lehtomäki, I. & Laakso, S. (2003). Effect of heat treatment on lipid stability in processed oats. *Journal of Cereal Science*, **37**(2), 215-221. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0496>
- Luzardo-Ocampo, I., Ramírez-Jiménez, A. K., Cabrera-Ramírez, Á. H., Rodríguez-Castillo, N., Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G. & Gaytán-Martínez, M. (2020). Impact of cooking and nixtamalization on the bioaccessibility and antioxidant capacity of phenolic compounds from two sorghum varieties. *Food chemistry*, **309**, 125684. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125684>
- Malekian, F. (2000). Lipase and lipoxygenase activity, functionality, and nutrient losses in rice bran during storage. *Bulletin*, **870**, 1-68.
- Meera, M. S., Bhashyam, M. K. & Ali, S. Z. (2011). Effect of heat treatment of sorghum grains on storage stability of flour. *LWT-Food Science and Technology*, **44**(10), 2199-2204. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.05.020>
- Moure, A., Cruz, J. M., Franco, D., Domínguez, J. M., Sineiro, J., Domínguez, H., Nuñez, M.J. & Parajó, J. C. (2001). Natural antioxidants from residual sources. *Food chemistry*, **72**(2), 145-171. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00223-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00223-5)
- Nantanga, K. K., Seetharaman, K., de Kock, H. L. & Taylor, J. R. (2008). Thermal treatments to partially pre-cook and improve the shelf-life of whole pearl millet flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **88**(11), 1892-1899. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3291>
- Ortiz-Cruz, R. A., Ramírez-Wong, B., Ledesma-Osuna, A. I., Torres-Chávez, P. I., Sánchez-Machado, D. I., Montaño-Leyva, B., López-Cervantes, J. & Gutiérrez-Dorado, R. (2020). Effect of Extrusion Processing Conditions on the Phenolic Compound Content and Antioxidant Capacity of Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Bran. *Plant Foods Hum Nutr* **75**, 252–257. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00810-6>
- Porta, A. V. (1993). El proceso de extrusión en cereales y habas de soja I. Efecto de la extrusión sobre la utilización de nutrientes. *Avances en Nutrición y Alimentación Animal: IX Curso de Especialización FEDNA*, 109-115.
- Prabhakar, J. V. & Venkatesh, K. V. L. (1986). A simple chemical method for stabilization of rice bran. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **63**(5), 644-646. <https://doi.org/10.1007/BF02638229>
- Ramos-Enríquez, J. R., Ramírez-Wong, B., Robles-Sánchez, R. M., Robles-Zepeda, R. E., González-Aguilar, G. A. & Gutiérrez-Dorado, R. (2018). Effect of extrusion conditions and the optimization of phenolic compound content and antioxidant activity of wheat bran using response surface methodology. *Plant foods for human nutrition*, **73**(3), 228-234. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0679-9>
- Rocchetti, G., Giuberti, G., Busconi, M., Marocco, A., Trevisan, M. & Lucini, L. (2020). Pigmented sorghum polyphenols as potential inhibitors of starch digestibility: An *in vitro* study combining starch digestion and untargeted metabolomics. *Food Chemistry*, **312**, 126077. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126077>
- Salazar López, N. J., Loarca-Piña, G., Campos-Vega, R., Gaytán Martínez, M., Morales Sánchez, E., Esquerra-Brauer, J. M., González-Aguilar, G.A. & Robles Sánchez, M. (2016). The extrusion process as an alternative for improving the biological potential of sorghum bran: phenolic compounds and antiradical and anti-inflammatory capacity. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. <https://doi.org/10.1155/2016/8387975>
- Sánchez-Machado, D. I., López-Cervantes, J., Lopez-Hernandez, J. & Paseiro-Losada, P. (2004). Fatty acids, total lipid, protein and ash contents of processed edible seaweeds. *Food chemistry*, **85**(3), 439-444. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.08.001>
- SAS (2002). SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Sharma, S., Kaur, S., Dar, B. N. & Singh, B. (2014). Storage stability and quality assessment of processed cereal brans. *Journal of food science and technology*, **51**(3), 583-588. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0537-3>
- Ti, H., Zhang, R., Zhang, M., Wei, Z., Chi, J., Deng, Y. & Zhang, Y. (2015). Effect of extrusion on phytochemical profiles in milled fractions of black rice. *Food chemistry*, **178**, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.087>
- Wang, T., He, F. & Chen, G. (2014). Improving bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in cereal grains through processing technologies: A concise review. *Journal of Functional Foods*, **7**, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.01.033>
- Weller, C. L. & Hwang, K. T. (2005). Extraction of lipids from grain sorghum DDG. *Transactions of the ASAE*, **48**(5), 1883-1888. <https://doi.org/10.13031/2013.19986>
- Zhang, G. & Hamaker, B. R. (2005). Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) flour pasting properties influenced by free fatty acids and protein. *Cereal chemistry*, **82**(5), 534-540. <https://doi.org/10.1094/CC-82-0534>
- Zielinski, H., Kozłowska, H. & Lewczuk, B. (2001). Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **2**(3), 159-169. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(01\)00040-6](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(01)00040-6)