

## Compuestos fenólicos y actividad antioxidante en líneas experimentales de sorgo pigmentado cultivado en Coahuila México

Antonio Flores-Naveda<sup>1</sup>, Felicito Díaz-Vázquez<sup>1</sup>, Norma Angélica Ruiz-Torres<sup>1</sup>, Mario Ernesto Vázquez-Badillo<sup>1</sup>, Guillermo Niño-Medina<sup>2</sup>, Neymar Camposeco-Montejo<sup>1</sup>, Pablo Rodríguez-Salinas<sup>2</sup>, Josué I. García-López<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Fitomejoramiento, Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas. Calzada Antonio Narro 1923, Col. Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Laboratorio de Química y Bioquímica. Francisco Villa S/N, Col. Ex-Hacienda, El Canadá, C.P. 66050, General Escobedo, Nuevo León, México

### Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar y comparar las características de color, el contenido fenoles totales, flavonoides totales, taninos condensados, antocianinas totales y la capacidad antioxidante de siete líneas experimentales de sorgo pigmentados (color de grano naranja y rojo) cultivados en Coahuila, México. Los resultados revelaron que los valores de luminosidad, la saturación del color y el ángulo de tono ( $L^*$ ,  $C^*$  y  $h$ ) se encontraron en un rango de 39 a 64, 14 a 18 y 40 a 80, respectivamente, lo que indica que las muestras analizadas se encontraron en el cuadrante rojo-amarillo del círculo de matices. Por otra parte, los análisis químicos indican un amplio rango de variabilidad en el contenido de fenoles totales (84,77-1203,96 mg GAE/100 g), flavonoides totales (11,70-1012,14 mg CE/100 g), taninos condensados (269,95-2831,61 mg CE/100 g) y antocianinas totales (11,87-29,06 mg C3G/100 g). Las capacidades antioxidantes mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), con un rango de 447,86  $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$  a 7579,17  $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$ , y 661,92  $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$  a 9435,91  $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$  para los ensayos de DPPH (2,2-difenil-1-picrylhydrazyl) y ABTS (2,2'-azinobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)). Se observó una alta correlación negativa entre el contenido de fenoles totales y los parámetros de color  $L^*$ ,  $C^*$  y  $h$ , lo que sugiere que los granos oscuros presentaron los niveles más altos de compuestos antioxidantes. Los resultados de esta investigación, se utilizarán para seleccionar líneas experimentales de sorgo que puedan ser utilizados en programas de mejoramiento genético para aumentar el contenido de compuestos bioactivos y ampliar sus aplicaciones en la industria para generar alimentos nutraceuticos.

**Palabras clave:** *Sorghum bicolor*, fenoles totales, flavonoides totales, antocianinas, DPPH, ABTS.

\* Autor para correspondencia: g.lopezj90@gmail.com

Cita del artículo: Flores-Naveda A, Díaz-Vázquez F, Ruiz-Torres NA, Vázquez-Badillo ME, Niño-Medina G, Camposeco-Montejo N, Rodríguez-Salinas PA, García-López JI (2021). Compuestos fenólicos y actividad antioxidante en líneas experimentales de sorgo pigmentado cultivado en Coahuila México. ITEA-Infomación Técnica Económica Agraria 117(5): 478-493. <https://doi.org/10.12706/itea.2021.011>

## Phenolic compounds and antioxidant activity in experimental lines of pigmented sorghum grown in Coahuila Mexico

### Abstract

The objective of this study was to evaluate and compare the characteristics of color, content of total phenols, total flavonoids, condensed tannins, total anthocyanins and the antioxidant capacity of seven experimental lines of pigmented sorghum (orange and red grain color) grown in Coahuila, Mexico. Results revealed that the values of lightness, color saturation and hue angle ( $L^*$ ,  $C^*$  and  $h$ ) were found in a range of 39 to 64, 14 to 18 and 40 to 80, respectively, which indicates that the analyzed samples were found in the red-yellow quadrant of the hue circle. On the other hand, chemical analyzes indicate a wide range of variability in the content of total phenols (84.77-1203.96 mg GAE/100 g), total flavonoids (11.70-1012.14 mg CE/100 g), condensed tannins (269.95-2831.61 mg CE/100 g) and total anthocyanins (11.87-29.06 mg C3G/100 g). Antioxidant capacities showed significant differences ( $p \leq 0.05$ ), with a range of 447.86  $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$  to 7579.17  $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ , and 661.92  $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$  to 9435.91  $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$  for the DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) and ABTS assays (2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)). A high negative correlation was observed between the content of total phenols and the color parameters  $L^*$ ,  $C^*$  and  $h$ , which suggests that the dark grains presented the highest levels of antioxidant compounds. Results of this research will be used to select experimental lines of sorghum that can be used in genetic improvement programs to increase the content of bioactive compounds and expand their applications in the industry to generate nutraceutical foods.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*, total phenols, total flavonoids, anthocyanins, DPPH, ABTS.

### Introducción

El sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) es considerado el quinto cultivo más importante después del trigo, el arroz, el maíz y la cebada, en particular, se informa de su uso como alimento básico en Asia, África y otras regiones semiáridas (Shen et al., 2018). La composición nutricional del sorgo varía según el genotipo, en general, los carbohidratos (polisacáridos de almidón), proteínas y lípidos son los componentes principales del grano (Espitia-Hernández et al., 2020). El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) informó que en promedio 100 g del grano tienen alrededor de 72,1 g de carbohidratos, 12,4 g de agua, 10,6 g de proteínas, 6,7 g de fibras y 3,5 g de lípidos, que proporcionan aproximadamente 1377 kJ de energía (USDA, 2019). Además, los compuestos fenólicos del sorgo se componen principalmente de ácidos fenólicos, 3-desoxiantocianidinas y taninos condensados que pueden mejorar la

salud intestinal y reducir los riesgos de enfermedades crónicas (Xiong et al., 2019).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAOSTAT), desde el año 2000 al 2018, México se ha colocado dentro de los 10 principales productores de sorgo, ocupando el cuarto lugar, después de Estados Unidos de América, Nigeria e India (FAOSTAT, 2018). De acuerdo con las estadísticas reportadas por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), la superficie sembrada para la producción de grano en México para el año 2019 fue de 1 354 873 ha, de las cuales se cosecharon 1 230 754 ha con las cuales se alcanzó un rendimiento promedio de 3,3 t/ha (SIAP, 2019).

El sorgo se considera un cultivo de importancia económica en los países en desarrollo, ya que el crecimiento y desarrollo de las plantas presentan resistencia contra el estrés biótico y abiótico (Emendack et al., 2018) y puede contribuir al suministro de alimentos para la

creciente población mundial, especialmente como opción para generar alimentos de consumo en pacientes celíacos (Pontieri *et al.*, 2013). El sorgo de grano blanco es a menudo utilizado en la cocina, mientras que los sorgos de grano rojo y marrón con mayor contenido de compuestos bioactivos, como los polifenólicos, se utilizan regularmente para la elaboración de cerveza (Lim, 2013).

Los compuestos fenólicos, son beneficiosos para la salud humana y se aplican en la producción de alimentos procesados como ingredientes funcionales (Bhuyan y Basu, 2017; Shen *et al.*, 2018). Se ha informado que los compuestos bioactivos aislados del sorgo, principalmente los fenólicos, promueven cambios beneficiosos en parámetros relacionados con enfermedades no transmisibles como obesidad, diabetes, dislipidemia, enfermedades cardiovasculares, cáncer e hipertensión (De Morais *et al.*, 2017). En este sentido, los programas orientados al mejoramiento genético de plantas deben considerar el desarrollo de sorgos con alta concentración de compuestos bioactivos.

El sorgo tiene una amplia gama de compuestos fenólicos concentrados en el pericarpio que incluyen ácidos fenólicos, flavonoides y taninos condensados (Dykes *et al.*, 2013), sin embargo, la concentración y composición de fenólicos está influenciada tanto por el genotipo, como por los efectos ambientales (Taleon *et al.*, 2012). Diversos estudios han informado una gran diversidad en la concentración de los principales compuestos fenólicos en sorgos con diferentes pigmentaciones (López-Contreras *et al.*, 2015; Shen *et al.*, 2018), se ha reportado que la concentración de flavonoides en sorgos de grano blanco fue menor, en comparación con los de pericarpio amarillo-limón que presentaron los contenidos más altos (Dykes *et al.*, 2011).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar y comparar las características de color, el contenido compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de líneas experimentales de sorgo cultivadas en Coahuila México. La información generada de esta investigación, servirá para seleccionar líneas experimentales de sorgo que puedan ser utilizados en programas de mejoramiento genético para aumentar el contenido de compuestos fenólicos y su utilización en la industria alimentaria.

## Material y métodos

### *Material genético*

Los granos de las siete líneas experimentales de sorgo con diferentes pigmentaciones, provienen de accesiones del Programa de Mejoramiento de Sorgo del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Todas las líneas experimentales fueron cultivadas durante el ciclo agrícola primavera-verano 2019, en el Campo Experimental Bajío UAAAN en Saltillo, Coahuila localizado a 25° 21' 29" Latitud N, 101° 02' 21" Longitud O, a una altitud de 1742 m s.n.m., con una precipitación media anual de 350-400 mm y una temperatura media anual de 19,8 °C.

### *Preparación de la muestra*

El grano de cada línea experimental, fue separado de la panícula de forma manual, enseguida fue trillado a una humedad del 12 % al 13 %, y posteriormente se almacenaron a -20 °C en frascos color ámbar hasta el momento llevar a cabo los análisis. En la Tabla 1, se presentan las características del grano de cada línea experimental.

Tabla 1. Líneas experimentales de sorgo seleccionadas para el estudio.  
 Table 1. Sorghum experimental lines selected to be studied.

Línea experimental	Origen	Fecha obtenida	Imagen
LES-35	Saltillo, Coahuila	Noviembre 2019	
LES-75	Saltillo, Coahuila	Noviembre 2019	
LES-17	Saltillo, Coahuila	Noviembre 2019	
LES-12	Saltillo, Coahuila	Noviembre 2019	
LES-13	Saltillo, Coahuila	Noviembre 2019	
LES-102	Saltillo, Coahuila	Noviembre 2019	
LES-93	Saltillo, Coahuila	Noviembre 2019	

### Color del grano

En una caja Petri (4,73 cm × 1,5 cm) se colocaron 100 g de grano de cada línea experimental y se determinó el color con un lector Konica Minolta (CR-10 Tokio, Japón). Los parámetros cromáticos se obtuvieron utilizando los sistemas de color CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) y CIELCH ( $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h^*$ ) de acuerdo con la Comisión Internacional de Iluminación de Alimentos (CIE, 2004).

$L^*$  define la luminosidad (0 negro, 100 blanco),  $a^*$  indica rojo positivo (positivo  $a^*$ ) o valor verde (negativo  $a^*$ ) y  $b^*$  indica amarillo (positivo  $b^*$ ) o valor azul (negativo  $b^*$ ),  $C^*$  (cromo; nivel de saturación de  $h$ ) y  $h$  (ángulo de tono:  $0^\circ$  = rojo,  $90^\circ$  = amarillo,  $180^\circ$  = verde,  $270^\circ$  = azul). La visualización del color se obtuvo mediante el software en línea ColorHexa, convertidor de color utilizando los valores  $L^*$ ,  $C^*$  y  $h^*$  (ColorHexa, 2017).

### **Color de harina**

Cien gramos de granos (endospermo y salvado) de cada línea experimental fueron molidos en un molino eléctrico KRUPS GX4100 (Medford, MA, USA), después se tamizaron para obtener partículas con tamaño  $<0,5$  mm (malla estándar 35). Posteriormente, la harina fue colocada en una caja Petri (4,73 cm  $\times$  1,5 cm), y el color se determinó como se describió anteriormente.

### **Extracción de compuestos fenólicos**

La extracción de compuestos fenólicos se realizó de acuerdo con Rodríguez-Salinas et al. (2020). Para la extracción, 200 mg de muestra de sorgo fueron suspendidos con 3 mL de metanol al 80 %, se purgó durante 30 s con argón y se agitó durante 2 h a 200 rpm. Después, las muestras se centrifugaron a 5750g (25 °C, 5 min) y el sobrenadante fue recuperado y almacenado a  $-20$  °C hasta su análisis.

### **Fenoles totales**

Los ensayos de fenólicos totales, flavonoides totales, taninos condensados y de capacidad antioxidante se realizaron en un espectrofotómetro Thermo Spectronic BioMate3 (Rochester, NY, USA), de acuerdo con lo establecido por López-Contreras et al. (2015). Para la determinación del contenido de fenoles, se tomaron 0,2 mL de cada extracto y se agregaron 2,6 mL de agua destilada y 0,2 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu. Después de 5 min, se agregaron 2 mL de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 7 % y la solución se agitó durante 30 s, para luego llevar la reacción en oscuridad por 90 min, posteriormente se midió la absorbancia de las muestras a 750 nm. La concentración de fenoles se reportó en miligramos equivalente de ácido gálico por cien gramos de muestra (mg GAE/100 g), calculado a partir de la curva de calibración de ácido gálico de 0 mg  $\text{L}^{-1}$  a 200 mg  $\text{L}^{-1}$ .

### **Flavonoides totales**

La determinación del contenido de flavonoides se basó en la reacción del complejo  $\text{AlCl}_3\text{-NaNO}_2\text{-NaOH}$ , para esto se tomaron 0,2 mL del extracto y se agregaron 3,5 mL de agua destilada. Posteriormente, se agregaron 0,15 mL de  $\text{NaNO}_2$  al 5 %, 0,15 mL de  $\text{AlCl}_3$  al 10 % y 1 mL de  $\text{NaOH}$  1 M, a intervalos de 5 min cada uno. La reacción se dejó durante 15 min y después se midió la absorbancia a 510 nm. El contenido total de flavonoides se informó en miligramos de equivalentes de (+)-catequina por cien gramos de muestra (mg CE/100 g), calculado a partir de la curva de calibración de (+)-catequina de 0 mg  $\text{L}^{-1}$  a 200 mg  $\text{L}^{-1}$ .

### **Taninos condensados**

El contenido de taninos condensados se determinó mediante la reacción del complejo vainillina- $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Del extracto fenólico, se mezclaron 0,25 mL con 0,65 mL de solución de vainillina al 1 % y 0,65 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 25 % (vainillina y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  disueltos en metanol). La reacción se llevó a cabo durante 15 min a 30 °C, y finalmente, la absorbancia de las muestras se midió a 500 nm. El contenido de taninos condensados se reportó en miligramos equivalente de (+)-catequina por cien gramos de muestra (mg CE/100 g), calculados a partir de la curva de calibración para (+)-catequina de 0 mg  $\text{L}^{-1}$  a 200 mg  $\text{L}^{-1}$  (Rodríguez-Salinas et al., 2020).

### **Antocianinas totales**

El contenido total de antocianinas se determinó con base en lo establecido por Abdel-Aal y Hucl (1999). Para ello, 200 mg de harina de sorgo se homogenizaron con 10 mL de etanol-HCl 1 M (85:15 v/v, pH 1, 4 °C), se purgó por 30 s con argón y se agitaron a 200 rpm durante 30 min a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras se centrifugaron a 5750g (4 °C, 15 min) y finalmente, se

midieron 3,5 mL de sobrenadante a 535 nm. El contenido de antocianinas se informó como miligramos de equivalentes de cianidina-3-glucósido (C3G) por cien gramos de muestra (mg C3G/100 g) como sigue:

$$C = (A/\epsilon) \times (V/1000) \times MW \\ \times (1/\text{peso de muestra}) \times 10^6$$

Donde: C = concentración en mg C3G/L, A = absorbancia de muestra,  $\epsilon$  = absorción molar (mg C3G =  $26,695 \text{ cm}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ), V = volumen de muestra, MW = peso molecular de C3G (449,2 g/mol).

### Capacidad antioxidante

Los ensayos de capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) se realizaron de acuerdo con Rodríguez-Salinas *et al.* (2020). La capacidad antioxidante de DPPH (2,2-difenil-1-picrylhidrazil) se evaluó utilizando una solución de trabajo 60  $\mu\text{M}$  en metanol al 80 %, con una absorbancia ajustada a 0,7 a 517 nm. El ensayo se llevó a cabo mezclando 50  $\mu\text{L}$  del extracto fenólico con 1,5 mL de la solución de trabajo DPPH, la reacción se dejó durante 30 min en la oscuridad y se determinó la absorbancia.

La capacidad antioxidante de ABTS [2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)] se llevó a cabo utilizando una solución de trabajo obtenida mezclando 1 mL de ABTS al 7,4 mM y 1 mL de  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  al 2,6 mM, permitiéndoles reaccionar durante 12 h en oscuridad. Después, la absorbancia de la solución de trabajo se ajustó a 0,7 a 734 nm diluyendo con metanol. El ensayo ABTS se realizó mezclando 50  $\mu\text{L}$  del extracto fenólico con 1,5 mL de solución de trabajo ABTS. La reacción se dejó durante 30 min en la oscuridad y se midió la absorbancia.

La capacidad antioxidante para DPPH y ABTS se reportaron en micromoles de Trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico ácido) equivalente por cien gramos de muestra ( $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$ ), con base a la curva de ca-

libración con Trolox en concentraciones de 0  $\mu\text{mol/L}$  a 500  $\mu\text{mol/L}$ . Los valores de concentración media inhibitoria (IC50) de DPPH y ABTS se calculó para la cantidad de antioxidante requerido para inhibir el 50 % de la oxidación del radical, la absorbancia ajustada a 0,7 en las soluciones de trabajo se consideró como 100 % de oxidación, y se usó metanol como control. Los resultados se expresaron como miligramos de harina de sorgo por mililitro (mg/mL).

### Análisis estadístico

La diferencia estadística entre muestras se analizó mediante un análisis de varianza (ANOVA), y las medias se compararon con la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) utilizando el paquete estadístico SPSS versión 21.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Los resultados se informaron como valores medios de tres muestras  $\pm$  desviación estándar.








## Resultados y discusión

### Color del grano

Las características de color del grano de las líneas experimentales de sorgo mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre ellas (Tabla 2). Los valores de luminosidad ( $L^*$ ) oscilaron entre 39,26 y 64,31; lo que indica que todas las muestras analizadas presentaron mayor tendencia al blanco que al negro. El parámetro  $L^*$  fue menor en LES-93 y LES-12 (39,26 y 40,27; respectivamente), mientras que los valores más altos se presentaron en LES-75 y LES-35 (48,62 y 64,31; respectivamente). Estos resultados fueron similares a los reportados por Sedghi *et al.* (2012), quienes reportaron valores de  $L^*$  en un rango de 36 a 70 en genotipos de sorgo pigmentados. En relación con las propiedades de color, la luminosidad ( $L^*$ ) pueden disminuir debido al contenido de antocianinas en el grano (Yang *et*



Tabla 2. Parámetros cromáticos de líneas experimentales de sorgo pigmentado.  
Table 2. Chromatic parameters of experimental pigmented sorghum lines.

Línea experimental	Parámetros de color			Vista en color
	$L^*$	$C^*$	$h$	
LES-35	64,31 ± 0,87 <sup>a</sup>	16,88 ± 0,41 <sup>a</sup>	80,12 ± 0,64 <sup>a</sup>	
LES-75	48,62 ± 1,71 <sup>b</sup>	12,72 ± 0,73 <sup>b</sup>	57,75 ± 4,61 <sup>b</sup>	
LES-17	45,61 ± 1,38 <sup>b</sup>	18,57 ± 0,43 <sup>a</sup>	54,66 ± 2,12 <sup>b</sup>	
LES-12	40,27 ± 1,45 <sup>cd</sup>	18,49 ± 0,67 <sup>a</sup>	44,31 ± 3,25 <sup>cd</sup>	
LES-13	44,43 ± 1,57 <sup>c</sup>	17,89 ± 0,86 <sup>a</sup>	54,76 ± 2,25 <sup>b</sup>	
LES-102	44,01 ± 0,69 <sup>cd</sup>	17,86 ± 1,53 <sup>a</sup>	51,23 ± 2,04 <sup>bc</sup>	
LES-93	39,26 ± 1,55 <sup>e</sup>	14,01 ± 0,64 <sup>b</sup>	40,19 ± 4,28 <sup>d</sup>	

$L^*$ : luminosidad;  $C^*$ : saturación del color;  $h$ : ángulo de tono.

Los valores son el promedio de tres repeticiones. Medias ( $n = 3$ ) ± desviación estándar. Letras diferentes dentro de cada columna significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

al., 2008). En la Tabla 7, se observa un coeficiente de correlación negativo (-0,57) entre el valor de  $L^*$  y el contenido de antocianinas, lo que indica que los granos más oscuros presentan los niveles más altos de antocianinas.

Las líneas experimentales LES-17 y LES-12 mostraron los valores más altos en  $C^*$  (18,57 y 18,49; respectivamente) que indican una mayor saturación del color, los valores de  $C^*$  más bajos (12,72 y 14,01) se presentaron en LES-75 y LES-93, respectivamente. En este estudio, la saturación del color ( $C^*$ ) de todas las muestras fue bajo, con valores de 12,72 a 18,57 ubicados en la zona gris del círculo de matiz, estos resultados están de acuerdo con lo reportado por López-Contreras et al. (2015) quienes informaron valores en  $C^*$  de 12 a 20 en genotipos de sorgo bicolor cultivados en Nuevo León, México, sin embargo, los valores de  $L^*$  que reportan estos autores difieren de los encontrados en este estudio, ya que se encuentran en un rango de 64,68 a 83,61, estos resultados validan que los genotipos evalua-

dos son más oscuros que los reportados en la literatura. Según Yang y Zhai (2010), el índice de saturación del color ( $C^*$ ) es el componente cuantitativo de la cromaticidad, que es un parámetro bidimensional que corresponde con la saturación del color percibido.

Las lecturas del ángulo hue ( $h$ ) variaron de 40,19 a 80,12 (Tabla 2), de acuerdo con estos valores, el color de las muestras analizadas es rojo-amarillo, tono que se asocia con un valor de  $h^*$  de 90° en el círculo de matiz. Sin embargo, a pesar de que no existe una nomenclatura de clasificación definida para el color de los genotipos de sorgo de acuerdo con sus valores cromáticos (López-Contreras et al., 2015), con base en los valores obtenidos en  $L^*$ ,  $C^*$  y  $h$ , las líneas experimentales de sorgo se clasificaron en dos grupos de colores: 1) Naranja oscuro desaturado, que incluye a LES-35, LES-75, LES-17, LES-13 y LES-102; 2) Rojo oscuro desaturado, que incluye a LES-12 y LES-93.








### Color de la harina

Las características de color de las harinas mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) en los parámetros  $L^*$ ,  $C^*$  y  $h$  (Tabla 3). Los valores más bajos para  $L^*$  fueron 70,84 y 71,84 que corresponden a LES-12 y LES-93, respectivamente, mientras que los valores más altos (78,22 y 74,48) se reportaron en LES-35 y LES-13, respectivamente. Estos resultados fueron más bajos que los reportados por Palavecino et al. (2016), quienes obtuvieron valores de 76,90 a 88,10 en harinas provenientes de híbridos de sorgo. Es notable que las harinas presentaran un color más claro que el grano y, en consecuencia, una mayor luminosidad. Los incrementos de la luminosidad en las harinas pueden relacionarse con la presencia de una mayor proporción de endospermo durante el proceso de molienda (Eckhoff y Watson, 2009; Palavecino et al., 2016), a diferencia del valor obtenido de luminosidad en el pericarpio del grano, que es determinado

por la concentración de pigmentos (Rodríguez-Salinas et al., 2020). El índice de  $L^*$  es una característica importante para muchos alimentos, por lo tanto, las harinas que presentaron mayor luminosidad en este estudio podrían utilizarse cuando se desea mayor blancura en un producto, pero esto implicaría un menor contenido de polifenoles (Subramanian et al., 1994; Palavecino et al., 2016).

Las lecturas de  $C^*$  para todas las muestras fueron bajas, con valores de 9,02 a 12,87 (Tabla 3) ubicados en la zona gris del círculo de matiz. Con respecto al ángulo hue ( $h$ ), los valores de las muestras analizadas se encontraron en el cuadrante rojo-amarillo con valores de 64,54 a 78,22, lo que indica que el amarillo es la característica cromática más importante de las harinas de sorgo. Estos resultados pueden relacionarse con la presencia de una mayor proporción de endospermo corneo amarillo (Eckhoff y Watson, 2009; Palavecino et al., 2016).

Tabla 3. Parámetros cromáticos de la harina de sorgo obtenida de líneas experimentales de sorgo pigmentado.  
Table 3. Chromatic parameters of sorghum flour obtained from experimental pigmented sorghum lines.

Línea experimental	Parámetros de color			Vista en color
	$L^*$	$C^*$	$h$	
LES-35	78,22 ± 0,65 <sup>a</sup>	12,87 ± 0,29 <sup>a</sup>	78,22 ± 3,01 <sup>a</sup>	
LES-75	72,89 ± 0,50 <sup>bcd</sup>	10,32 ± 0,22 <sup>cd</sup>	68,23 ± 1,73 <sup>b</sup>	
LES-17	73,75 ± 1,04 <sup>bc</sup>	11,47 ± 0,42 <sup>b</sup>	67,03 ± 0,13 <sup>b</sup>	
LES-12	70,84 ± 1,00 <sup>d</sup>	11,05 ± 0,11 <sup>bc</sup>	64,54 ± 1,95 <sup>b</sup>	
LES-13	74,48 ± 0,64 <sup>b</sup>	11,31 ± 0,05 <sup>b</sup>	66,46 ± 1,86 <sup>b</sup>	
LES-102	73,66 ± 0,91 <sup>bc</sup>	9,02 ± 0,56 <sup>e</sup>	67,11 ± 0,83 <sup>b</sup>	
LES-93	71,84 ± 0,29 <sup>cd</sup>	9,58 ± 0,14 <sup>de</sup>	68,56 ± 2,83 <sup>b</sup>	

$L^*$ : luminosidad;  $C^*$ : saturación del color;  $h$ : ángulo de tono.

Los valores son el promedio de tres repeticiones. Medias ( $n = 3$ ) ± desviación estándar. Letras diferentes dentro de cada columna significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).



### Fenoles totales y flavonoides totales

Los resultados indicaron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) en fenoles y flavonoides totales entre las muestras analizadas (Tabla 4). La concentración de fenoles totales osciló entre 84,77 mg GAE/100 g a 1203,96 mg GAE/100 g. El nivel más alto de fenoles totales se obtuvo en LES-13 (1203,96 mg GAE/100 g), seguido de LES-17 (1041,41 mg GAE/100 g), mientras que LES-75 y LES-35 presentaron los valores más bajos (84,77 mg GAE/100 g y 89,30 mg GAE/100 g, respectivamente), el coeficiente de correlación negativo (-0,57) entre el valor de  $L^*$  y los fenoles totales in-

dica que los granos más oscuros presentaron los niveles más altos de compuestos fenólicos (Tabla 7). Las líneas LES-102, LES-93 y LES-12, presentaron una cantidad moderada de fenoles (445,21 mg GAE/100 g; 652,19 mg GAE/100 g y 749,83 mg GAE/100 g; respectivamente) en comparación con las otras líneas. El contenido de fenoles totales de las líneas experimentales de sorgo evaluadas es similar a los valores reportados por Shen et al. (2018), quienes obtuvieron una concentración de 174,40 mg GAE/100 g a 1238,83 mg GAE/100 g en genotipos de sorgo de grano blanco, negro, y marrón.

Tabla 4. Contenido de fenoles totales y flavonoides totales en líneas experimentales de sorgo pigmentado.  
Table 4. Content of total phenols and total flavonoids in pigmented sorghum experimental lines.

Línea experimental	Fenoles totales (mg GAE/100 g)	Flavonoides totales (mg CE/100 g)
LES-35	89,30 ± 4,06 <sup>f</sup>	11,70 ± 0,90 <sup>e</sup>
LES-75	84,77 ± 2,47 <sup>f</sup>	15,27 ± 1,55 <sup>e</sup>
LES-17	1041,41 ± 15,12 <sup>b</sup>	922,39 ± 26,42 <sup>b</sup>
LES-12	749,83 ± 28,06 <sup>c</sup>	617,33 ± 40,21 <sup>c</sup>
LES-13	1203,96 ± 55,61 <sup>a</sup>	1012,14 ± 37,23 <sup>a</sup>
LES-102	445,21 ± 37,24 <sup>e</sup>	260,45 ± 28,70 <sup>d</sup>
LES-93	652,19 ± 5,46 <sup>d</sup>	577,81 ± 27,46 <sup>c</sup>

Los valores son el promedio de tres repeticiones. Medias ( $n = 3$ ) ± desviación estándar. Letras diferentes dentro de cada columna significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

El análisis químico por cromatografía líquida de alta resolución con espectrometría de masas (HPLC-MS) ha demostrado que los granos de sorgo presentan un alto contenido de compuestos fenólicos en sus extractos, incluidos los ácidos fenólicos, flavonoides, glicéridos de fenilpropano y fenolamidas, la mayoría de estos compuestos se reportan por primera vez en granos integrales de sorgo (Kang et al., 2016). Estos resultados confir-

maron que los granos de sorgo son ricos en compuestos fenólicos. El contenido de polifenoles en el grano determina en gran medida su color, sin embargo, la variación en el contenido de compuestos polifenólicos en los granos de sorgo puede verse afectado por el genotipo y el ambiente de crecimiento (Hahn et al., 1984; Taleon et al., 2012).

El contenido de flavonoides totales presentó una tendencia similar al contenido de feno-

les (Tabla 4); LES-13 presentó el mayor contenido (1012,14 mg CE/100 g), seguido de LES-17, LES-12 y LES-93 con valores relativamente altos (922,39 mg CE/100 g; 617,33 mg CE/100 g y 577,81 mg CE/100 g; respectivamente), mientras que el menor contenido se obtuvo con LES-35 y LES-75 (11,70 mg CE/100 g y 15,27 mg CE/100 g; respectivamente), así mismo, se observan coeficientes de correlación negativos significativos entre  $L^*$  y el contenido de flavonoides (-0,57) y taninos condensados (-0,36), lo que sugiere que la pigmentación oscura en el pericarpio de los granos de sorgo se debe al contenido de estos compuestos (Tabla 7). Los datos obtenidos fueron similares a los reportados por Wu et al. (2017), quienes informaron que las concentraciones de flavonoides solubles en genotipos de sorgo fluctuaban entre 0,30 mg CE/g y 5,25 mg CE/g. La identificación y caracterización de compuestos fenólicos en granos de sorgo mediante HPLC-MS, permitió identificar que la apigenina y luteolina son las principales flavonas en genotipos de sorgo (Ofosu et al., 2020). Las variedades de sorgo de grano con testa pigmentada también con-

tienen taninos condensados (conocidos como proantocianidinas) que se componen de polímeros de flavan-3-oles, flavan-3,4-dioles y flavan-4-oles (glicosilados y no glicosilados) (Dykes y Rooney, 2006; Espitia-Hernández et al., 2020). Nuestros resultados coinciden con estudios anteriores, que han demostrado que los flavonoides son los compuestos predominantes en genotipos de sorgo con pericarpio y testa pigmentada (Yang et al., 2015; Ofosu et al., 2020). Los flavonoides son un grupo de compuestos fenólicos asociados con beneficios para la salud, la ingesta diaria de alimentos con altos niveles de flavonoides puede tener el potencial para reducir el riesgo de algunos tipos de cáncer, como colon, pancreático y cáncer de seno (Romagnolo y Selmin, 2012).

#### **Taninos condensados y antocianinas totales**

En la Tabla 5, se observa que todas las líneas experimentales con excepción de LES-75 y LES-75, tenían contenidos significativos de taninos condensados (269,95 mg CE/100 g a 2831,61 mg CE/100 g), siendo LES-13 y LES-17 los de mayor contenido (2831,61 mg CE/100 g

Tabla 5. Contenido de taninos condensados y antocianinas totales en líneas experimentales de sorgo pigmentado.

Table 5. Content of condensed tannins and total anthocyanins in pigmented sorghum experimental lines.

Línea experimental	Taninos condensados (mg CE/100 g)	Antocianinas totales (mg C3G/100 g)
LES-35	312,58 ± 12,07 <sup>d</sup>	14,87 ± 0,19 <sup>d</sup>
LES-75	269,95 ± 9,44 <sup>d</sup>	12,91 ± 0,17 <sup>d</sup>
LES-17	2796,98 ± 23,81 <sup>a</sup>	22,72 ± 0,09 <sup>c</sup>
LES-12	1665,31 ± 60,88 <sup>b</sup>	29,06 ± 0,06 <sup>a</sup>
LES-13	2831,61 ± 21,17 <sup>a</sup>	24,68 ± 0,11 <sup>b<sup>c</sup></sup>
LES-102	584,50 ± 7,82 <sup>c</sup>	11,87 ± 0,13 <sup>d</sup>
LES-93	737,74 ± 15,60 <sup>c</sup>	28,25 ± 0,08 <sup>ab</sup>

Los valores son el promedio de tres repeticiones. Medias (n = 3) ± desviación estándar. Letras diferentes dentro de cada columna significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

y 2796,98 mg CE/100 g; respectivamente). Los valores obtenidos para la mayoría de las muestras están de acuerdo con los resultados reportados por Dykes *et al.* (2013), quienes evaluaron genotipos de sorgo cultivados en College Station (TX, USA), e informaron valores en un rango de 0,70 mg CE/g a 48,47 mg CE/g, a excepción de LES-75 y LES-35 que mostraron valores más bajos que los citados por estos autores. De acuerdo con Dykes y Rooney (2006), LES-13 y LES-17 se pueden clasificar como sorgos de alto nivel en el contenido de taninos condensados.

El contenido de antocianinas afectó significativamente ( $p \leq 0,05$ ) el color del grano (Tabla 5). Los sorgos de grano rojo oscuro desaturado que incluyen a LES-12 y LES-93, presentaron los niveles más altos de antocianinas (29,06 mg C3G/100 g y 28,25 mg C3G/100 g; respectivamente), mientras que los sorgos de grano Naranja oscuro desaturado (LES-35, LES-75, LES-17, LES-13 y LES-102) presentaron niveles en un rango de 11,87 mg C3G/100 g a 22,72 mg C3G/100 g. El contenido de antocianinas presentó correlaciones negativas significativas en los valores de  $L^*$  y  $h$ , en el grano y la harina, con coeficientes de correlación de  $-0,57$  y  $-0,57$  en grano, y en harina de  $-0,48$  y  $-0,43$ , respectivamente (Tabla 7). Estos resultados revelan que el color se correlaciona con el contenido de antocianinas: a medida que disminuyen los valores de  $L^*$  y  $h$ , aumenta el contenido de antocianinas. Otros autores observaron una fuerte correlación negativa entre el valor de  $L^*$  y el contenido de antocianinas ( $L^* = -0,87$ ) en híbridos de sorgo (Dykes *et al.*, 2013).

Estudios previos han reportado que los sorgos de grano rojo presentan altos niveles de antocianinas Equivalentes de Apigeninidina (APGE) (1461,4 mg APGE/kg), seguido por sorgos color marrón (937,3 mg APGE/kg), mientras que los de pericarpio amarillo presentan bajos niveles (574,8 mg APGE/kg), además, las antocianinas pueden ser inde-

tectables en la mayoría de los sorgos de grano blanco (Su *et al.*, 2017). Las antocianinas más comunes en los granos de sorgo son las 3-desoxiantocianidinas, que incluyen luteolinidina y apigeninidina, estas antocianinas tienen una pequeña distribución en la naturaleza debido a la falta de un grupo hidroxilo en la posición C-3 y existen en la naturaleza sustancialmente como agliconas (Shen *et al.*, 2018), sin embargo, se ha reportado que el contenido de apigeninidina en granos de sorgos con diferentes pigmentaciones fue superior al contenido de luteolinidina (Awika *et al.*, 2003). Por otra parte, se ha demostrado que los sorgos con pericarpio de menor luminosidad tienen los niveles más altos de 3-desoxiantocianidinas, que se concentran en el salvado (Dykes *et al.*, 2005).

En este estudio se encontró una diversidad distinguible en el contenido de antocianinas entre los colores del grano de las líneas experimentales de sorgo. Los sorgos de grano rojo (LES-12 y LES-93) contenían los niveles más altos de antocianinas, pero las líneas experimentales de sorgo naranja presentaron mayor diversidad en el contenido. Diferentes autores, han reportado una gran diversidad en el contenido de antocianinas en granos de sorgo con diferentes pigmentaciones (Kenga *et al.*, 2006; Dykes *et al.*, 2011; Dykes *et al.*, 2006; Dykes *et al.*, 2013), sin embargo, aunque la capacidad en la biosíntesis de compuestos de tipo flavonoide está determinada por el genotipo, la actividad en la biosíntesis de antocianinas puede estar realmente influenciada por muchos factores ambientales (Su *et al.*, 2017).

### **Propiedades antioxidantes**

Los ensayos de DPPH y ABTS fueron seleccionados para determinar la capacidad antioxidante. Los resultados indican que las capacidades antioxidantes de las líneas experimentales de sorgo mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), con un rango de 447,86  $\mu\text{mol}$

TE/100 g a 7579,17  $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ , y 661,92  $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$  a 9435,91  $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$  para los ensayos de DPPH y ABTS, respectivamente (Tabla 6). En general, LES-17 y LES-13 obtuvieron los niveles más altos en los dos ensayos de capacidad antioxidante (DPPH y ABTS), mientras que LES-35 y LES-75 presentaron los valores más bajos, independientemente del ensayo. Las correlaciones entre el contenido fenoles totales (0,88 y 0,91; respectivamente), flavonoides totales (0,87 y 0,90; respectivamente), taninos condensados (0,95 y 0,96; respectivamente) y la capacidad antioxidante medida por DPPH y ABTS (Tabla 7) sugieren que los valores de compuestos fenólicos más altos en LES-17 y LES-13 está relacionados con una mayor capacidad antioxidante.

Dykes et al. (2005) mencionaron que una fuerte correlación entre los fenoles totales y la actividad antioxidante podría deberse al alto contenido de taninos condensados, flavonoides y antocianinas que contribuyen a la actividad antioxidante en granos de sorgo.

Además, existe una fuerte correlación (0,99) entre DPPH y ABTS, que también se ha observado en estudios previos (Awika et al., 2003; Dykes et al., 2013).

Wu et al. (2017) analizaron genotipos de sorgo pigmentados (grano negro, marrón, y rojo), y encontraron valores promedio más bajos que los obtenidos en este estudio, para DPPH de 0,42 mg TE/g a 25,49 mg TE/g, y 0,98 mg TE/g a 38,08 mg TE/g en ABTS. Dykes et al. (2013) reportaron en híbridos y líneas experimentales de sorgo con grano pigmentado valores de 80 mM TE/g a 334 mM TE/g en ABTS, mientras que los valores de DPPH fueron de 32 mM TE/g a 177 mM TE/g. Khan et al. (2013) mencionaron que la pasta de trigo que incorpora harina de sorgo rojo tenía una capacidad antioxidante más alta que la pasta de sorgo blanco o sin adición de sorgo, los altos niveles de capacidad antioxidante se atribuyen a una mayor concentración en el contenido de fenoles totales en harinas provenientes de sorgo rojo.

Tabla 6. Capacidad antioxidante DPPH y ABTS de líneas experimentales de sorgo pigmentado.  
Table 6. DPPH and ABTS antioxidant capacity of experimental pigmented sorghum lines.

Línea experimental	DPPH ( $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ )	IC50 (mg/mL)	ABTS ( $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ )	IC50 (mg/mL)
LES-35	479,77 $\pm$ 24,76 <sup>f</sup>	81	661,92 $\pm$ 42,10 <sup>f</sup>	38
LES-75	447,86 $\pm$ 33,21 <sup>f</sup>	86	663,11 $\pm$ 61,34 <sup>f</sup>	39
LES-17	6426,54 $\pm$ 110,78 <sup>b</sup>	6	7829,20 $\pm$ 85,08 <sup>b</sup>	3
LES-12	1691,52 $\pm$ 58,97 <sup>c</sup>	23	2900,51 $\pm$ 49,59 <sup>c</sup>	9
LES-13	7579,17 $\pm$ 40,02 <sup>a</sup>	5	9435,91 $\pm$ 144,75 <sup>a</sup>	3
LES-102	1053,33 $\pm$ 54,76 <sup>e</sup>	37	1532,61 $\pm$ 46,42 <sup>e</sup>	17
LES-93	1269,41 $\pm$ 139,97 <sup>d</sup>	31	2034,55 $\pm$ 115,84 <sup>d</sup>	12

DPPH: 2,2-difenil-1-picrylhidrazil; ABTS: 2,2'-azinobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid); IC50: valores de concentración media inhibitoria.

Los valores son el promedio de tres repeticiones. Medias (n = 3)  $\pm$  desviación estándar. Letras diferentes dentro de cada columna significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Tabla 7. Coeficientes de correlación de Pearson entre el contenido de compuestos fenólicos, parámetros de color ( $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$ ) y actividad antioxidante.  
 Table 7. Pearson's correlation coefficients between the content of phenolic compounds, color parameters ( $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$ ) and antioxidant activity.

	$C^*$ grano	$h$ grano	$L^*$ harina	$C^*$ harina	$h$ harina	Fenoles totales	Flavonoides totales	Taninos condensados	Antocianinas totales	DPPH	ABTS
$L^*$ grano	-0,020	0,971**	0,876**	0,682**	0,869**	-0,572**	-0,571**	-0,360**	-0,575**	-0,243	-0,293
$C^*$ grano		0,825	0,160	0,302	-0,150	0,548**	0,493*	0,602**	0,214	0,490*	0,504*
$h$ grano			0,890**	0,709**	0,807**	-0,473*	-0,483*	-0,240	-0,579**	-0,112	-0,165
$L^*$ harina				0,588**	0,780**	-0,296	-0,302	-0,143	-0,487*	0,030	-0,019
$C^*$ harina					0,508**	0,011	0,034	0,258	0,052	0,0252	0,233
$h$ harina						-0,562**	-0,544**	-0,469*	-0,439*	-0,354	-0,391
Fenoles totales							0,991**	0,937**	0,688**	0,885**	0,916**
Flavonoides totales								0,933**	0,731**	0,879**	0,909**
Taninos condensados									0,559**	0,950**	0,965**
Antocianinas totales										0,397	0,457
DPPH											0,996**

$L^*$ : luminosidad;  $C^*$ : saturación del color;  $h$ : ángulo de tono; DPPH: 2,2-difenil-1-picrylhydrazyl; ABTS: 2,2'-azino bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid).

\* Significativo ( $p \leq 0,05$ ); \*\* significativo ( $p \leq 0,01$ ).

## Conclusiones

Las líneas experimentales de sorgo evaluadas en este estudio confirman que existe amplia variabilidad entre líneas, en relación al contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante. Las líneas LES-17 y LES 13 presentaron los mayores contenidos de fenoles totales, flavonoides totales, taninos condensados y capacidad antioxidante, mientras que LES-12 presentó el mayor contenido de antocianinas totales. Por lo anterior, las tres líneas experimentales se continuarán trabajando como base del Programa de Mejoramiento del CCCTS, con la finalidad de generar sorgos con mayor contenido de compuestos bioactivos que puedan ser utilizados en la industria para generar alimentos nutraceuticos.

## Agradecimientos

Al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica 2020 de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) por el financiamiento otorgado al Dr. Josué I. García-López y al Dr. Antonio Flores-Naveda a través de los proyectos 30-38111-425 105001-2393 y 30-38111-425105001-2920, respectivamente.

## Referencias bibliográficas

- Abdel-Aal ES, Hucl P (1999). A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry* 76: 350-354. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.3.350>.
- Awika JM, Rooney LW, Wu X, Prior RL, Cisneros-Zevallos L (2003). Screening methods to measure antioxidant activity of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 6657-6662. <https://doi.org/10.1021/jf034790i>.
- Bhuyan DJ, Basu A (2017). Phenolic compounds: potential health benefits and toxicity. En: *Utilisation of Bioactive Compounds From Agricultural and Food Production Waste* (Ed. Vuong QV), pp 27-59. Taylor & Francis, CRC Press.
- CIE (2004). Commission Internationale De L' eclaireage (CIE): Technical Report: Colorimetry 3rd ed. CIE Publicaciones, Viena Austria, 37 p.
- ColorHexa (2017). Enciclopedia de colores: Información y Conversión. Software de ordenador. Disponible en: <https://www.colorhexa.com/index.php> (Consultado: 13 julio 2020).
- De Moraes CL, Pinheiro SS, Martino HS, Pinheiro-Sant'Ana HM (2017). Sorghum (*Sorghum bicolor* L.): Nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 57: 372-390. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.887057>.
- Dykes L, Rooney LW, Waniska RD, Rooney WL (2005). Phenolic compounds and antioxidant activity of sorghum grains of varying genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53: 6813-6818. <https://doi.org/10.1021/jf050419e>.
- Dykes L, Rooney LW (2006). Sorghum and millet phenols and antioxidants. *Journal of Cereal Science* 44: 236-251. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.007>.
- Dykes L, Peterson GC, Rooney WL, Rooney LW (2011). Flavonoid composition of lemon-yellow sorghum genotypes. *Food Chemistry* 128: 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.020>.
- Dykes L, Rooney WL, Rooney LW (2013). Evaluation of phenolics and antioxidant activity of black sorghum hybrids. *Journal of Cereal Science* 58: 278-283. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.06.006>.
- Eckhoff SR, Watson SA (2009). Corn and sorghum starches: production. En: *Starch: Chemistry and technology* (Eds. BeMiller J y Whistler R), pp. 373-439. New York: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-746275-2.00009-4>.
- Emendack Y, Burke J, Laza H, Sanchez J, Hayes C (2018). Abiotic stress effects on sorghum leaf dhurrin and soluble sugar contents throughout



- plant development. *Crop Science* 58: 1706-1716. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.01.0059>.
- Espitia-Hernández P, Chávez González ML, Ascacio-Valdés JA, Dávila-Medina D, Flores-Nevada, A, Teresinha S, Ruelas Chacón X, Sepúlveda L (2020). Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) as a potential source of bioactive substances and their biological properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 1-12. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1852389>.
- FAOSTAT (2018). Food and Agriculture Organization statistical database. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (Consultado: 17 agosto 2020).
- Hahn DH, Rooney LW, Earp CF (1984). Tannins and phenols of sorghum. *Cereal Foods World* 29: 776-779.
- Kang J, Price WE, Ashton J, Tapsell LC, Johnson S (2016). Identification and characterization of phenolic compounds in hydromethanolic extracts of sorghum wholegrains by LC-ESI-MSn. *Food Chemistry* 211: 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.052>.
- Kenga R, Tenkouano A, Gupta SC, Alabi SO (2006). Genetic and phenotypic association between yield components in hybrid sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) populations. *Euphytica* 150: 319-326. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9108-5>.
- Khan I, Yousif A, Johnson SK, Gamlath S (2013). Effect of sorghum flour addition on resistant starch content, phenolic profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta. *Food Research International* 54: 578-586. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.07.059>.
- Lim TK (2013) *Fagopyrum esculentum*. En: *Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants* (Ed. Lim TK), pp 459-493. Springer: Dordrecht, The Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5653-3\\_25](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5653-3_25).
- López-Contreras JJ, Zavala-García F, Urías-Orona V, Martínez-Ávila GCG, Rojas R, Niño-Medina G (2015). Chromatic, phenolic and antioxidant properties of Sorghum bicolor genotypes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 43: 366-370. <https://doi.org/10.15835/nbha4329949>.
- Ofori FK, Elahi F, Daliri EBM, Yeon SJ, Ham HJ, Kim JH, Sang-Ik H, Deog-Hwan O (2020). Flavonoids in decorticated sorghum grains exert antioxidant, antidiabetic and antiobesity activities. *Molecules* 25: 2854. <https://doi.org/10.3390/molecules25122854>.
- Palavecino PM, Penci MC, Calderón-Domínguez G, Ribotta PD (2016). Chemical composition and physical properties of sorghum flour prepared from different sorghum hybrids grown in Argentina. *Starch/Stärke* 68: 1055-1064. <http://dx.doi.org/10.1002/star.201600111>.
- Pontieri P, Mamone G, De Caro S, Tuinstra M, Romer E, Okot J, De Vita P, Ficco D, Alifano P, Pignone D, Massardo D, Del Giudice L (2013). Sorghum, a healthy and gluten-free food for celiac patients as demonstrated by genome, biochemical, and immunochemical analyses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61: 2565-2571. <https://doi.org/10.1021/jf304882k>.
- Rodríguez-Salinas PA, Zavala-García F, Urías-Orona V, Muy-Rangel D, Heredia JB, Niño-Medina G (2020). Chromatic, nutritional and nutraceutical properties of pigmented native maize (*Zea mays* L.) genotypes from the northeast of Mexico. *Arabian Journal for Science and Engineering* 45: 95-112. <https://www.doi.org/10.1007/s13369-019-04086-0>.
- Romagnolo DF, Selmin OI (2012). Flavonoids and cancer prevention: a review of the evidence. *Journal of Nutrition in Gerontology and Geriatrics* 31: 206-238. <https://doi.org/10.1080/21551197.2012.702534>.
- Sedghi M, Golian A, Soleimani-Roodi P, Ahmadi A, Aami-Azghadi M (2012). Relationship between color and tannin content in sorghum grain: application of image analysis and artificial neural network. *Brazilian Journal of Poultry Science* 14: 57-62. <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2012000100010>.
- Shen S, Huang R, Li C, Wu W, Chen H, Shi J, Chen S, Ye X (2018). Phenolic compositions and antioxidant activities differ significantly among sorghum grains with different applications. *Molecules* 23: 2-15. <https://doi.org/10.3390/molecules23051203>.

- SIAP (2019). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap#1410> (Consultado: 28 julio 2020).
- Su X, Rhodes D, Xu J, Chen X, Davis H, Wang D, Herald TJ, Wang W (2017). Phenotypic diversity of anthocyanins in sorghum accessions with various pericarp pigments. *Journal of Nutrition & Food Sciences* 10: 2155-9600. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000610>.
- Subramanian V, Hosene RC, Bramel-Cox P (1994). Factors affecting the color and appearance of sorghum starch. *Cereal Chemistry* 71: 275-278.
- Taleon V, Dykes L, Rooney WL, Rooney LW (2012). Effect of genotype and environment on flavonoid concentration and profile of black sorghum grains. *Journal of Cereal Science* 56: 470-475. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.05.001>.
- USDA (2019). United States Department of Agriculture. Disponible en: <https://www.usda.gov/topics/data> (Consultado: 07 diciembre 2020).
- Wu G, Johnson SK, Bornman JF, Bennett SJ, Fang Z (2017). Changes in whole grain polyphenols and antioxidant activity of six sorghum genotypes under different irrigation treatments. *Food Chemistry* 214: 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.089>.
- Xiong Y, Zhang P, Warner RD, Fang Z (2019). Sorghum grain: From genotype, nutrition, and phenolic profile to its health benefits and food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 18: 2025-2046. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12506>.
- Yang L, Allred KF, Dykes L, Allred CD, Awika JM (2015). Enhanced action of apigenin and naringenin combination on estrogen receptor activation in non-malignant colonocytes: Implications on sorghum-derived phytoestrogens. *Food and Function* 6: 749-755. <https://doi.org/10.1039/c4fo00300d>.
- Yang Z, Han Y, Gu Z, Fan G, Chen Z (2008). Thermal degradation kinetics of aqueous anthocyanins and visual color of purple corn (*Zea mays* L.) cob. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 9:341-347. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.09.001>.
- Yang Z, Zhai W (2010). Identification and antioxidant activity of anthocyanins extracted from the seed and cob of purple corn (*Zea mays* L.). *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 11: 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.08.012>.

(Aceptado para publicación el 8 de marzo de 2021)