

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO Y DE
PROPIEDADES NUTRACÉUTICAS DE GERMOPLASMA DE SORGO PARA
CONSUMO HUMANO

Tesis

Que presenta FELÍCITO AUSENCIO DÍAZ VÁZQUEZ
Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

Saltillo, Coahuila

Junio 2020

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO Y DE
PROPIEDADES NUTRACÉUTICAS DE GERMOPLASMA DE SORGO PARA
CONSUMO HUMANO

Tesis

Elaborada por FELÍCITO AUSENCIO DÍAZ VÁZQUEZ como requisito parcial
para obtener el Grado de Maestro en Tecnología de Granos y Semillas, con la
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Antonio Flores Naveda
Asesor Principal



Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo
Asesor



Dra. Norma Angélica Ruíz Torres
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado
UAAAN

AGRADECIMIENTOS

A Dios, primeramente, porque creo en la existencia de un ser superior a mí y porque creo en el milagro de la vida, la cual, aunque la ciencia explique su razón de ser, requiere de una parte espiritual que debe ser adoptada como un pilar emocional que me ha permitido ser cada día mejor persona.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, Alma Mater que me ha cobijado y brindado la oportunidad de formarme en mi vida profesional y humana, tanto en nivel licenciatura y actualmente en maestría, permitiéndome formar parte de una gran institución.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por aportar los recursos necesarios para que al igual que yo, muchas personas entusiastas logren una formación a nivel posgrado, logrando con ello el desarrollo científico y tecnológico del país.

Al **Dr. Antonio Flores Naveda**, por compartir de su conocimiento, experiencia y afecto, mismos que permitieron el logro de todos los trabajos realizados durante mi estancia en la maestría. Gracias por la humildad y por la calidez humana que siempre demuestra en su actividad profesional.

Al **Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo**, por las aportaciones, comentarios y sugerencias que permitieron el logro de este trabajo de investigación y por su gran preocupación por que la formación profesional recibida siempre sea de calidad.

A la **Dra. Norma Angélica Ruíz Torres**, por las sugerencias, correcciones y mejoras aportadas a este trabajo de investigación y por su exigencia y dedicación en la formación de Tecnólogos de Semillas capaces de solucionar y aportar mejoras en el área profesional y laboral.

Al **Dr. Josué Israel García López**, por aportar su conocimiento científico, técnico y académico, y por sus sugerencias en el logro de este trabajo permitiendo complementar de manera exitosa la investigación.

A todo el personal académico y administrativo, en especial a todos los Doctores que conforman el **Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas**, **Dra. Leyla, Dr. Arturo, Dr. Neymar**, sus cursos, consejos, correcciones y sugerencias en las clases impartidas han sido de gran importancia en la formación profesional recibida por cada uno de ustedes. A **Cristina, Irma, Graciela, Nelly, Irene y Lorenzo** por el apoyo en las actividades y tareas tanto académicas, trabajo de campo y administrativas, gracias a ustedes que permiten y ayudan a que todo esto funcione.

A la Dirección y Subdirección de Investigación y al Departamento de Prácticas Profesionales, por todo el apoyo en materiales, infraestructura y recurso económico mediante el cual fue posible financiar los gastos realizados durante la investigación.

Y a todos aquellos que de manera directa o indirecta aportaron conocimiento, tiempo o de alguna forma contribuyeron a que los objetivos planteados al inicio de este proceso se logaran en tiempo y forma, a todos ustedes dirijo mi más sincero agradecimiento.

DEDICATORIA

A MI ESPOSA

Ana Guadalupe Ayanegui Vázquez, por motivarme a iniciar los estudios de posgrado, por apoyarme incondicionalmente durante todo este tiempo y por ser mi fuente de motivación cuando las cosas no marchan bien. Gracias por ser esa mujer trabajadora, valiente y con carácter que ha complementado mi existencia.

A MIS PADRES

José L. Díaz Núñez y María L. Vázquez Gutiérrez, por concederme ese milagro tan maravilloso de vivir, por inculcarme desde la infancia los valores necesarios para ser un ciudadano de bien.

A MI SEGUNDA FAMILIA

Ramiro Ayanegui Vázquez, Candelaria Vázquez Hernández, José Valdemar García López y María Victoria Ayanegui Vázquez, por tanto, cariño y apoyo, sin duda ocupan un lugar importante en este logro, ya que siempre han sido fuente de inspiración, enseñándome que todo es posible y que el éxito en la vida siempre debe ir acompañado de una porción doble de humildad.

A MIS HERMANOS

Daniel Alonso, Jesús y José Alejandro, por quienes siempre he tratado de ser mejor persona y un hombre de bien, sabiendo que, como hermano mayor, mi responsabilidad es predicarles con el ejemplo.

A MIS COMPAÑEROS DE POSTGRADO Y LICENCIATURA

Omar Cordero, Abraham Cordero, Merari S. Vázquez, Isaí López, Rubén Lecona, Mirna Sánchez, Raúl Nájera, Roberto C. Espinoza, Francisco Nájera, Jesús Izaguirre y Levi Herrera por los buenos momentos compartidos y por mostrar una capacidad profesional en todos los trabajos desarrollados, a todos ellos les deseo mucho éxito profesional.

ÍNDICE GENERAL

| | Página |
|--|--------|
| AGRADECIMIENTOS..... | iii |
| DEDICATORIA | v |
| ÍNDICE DE CUADROS | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | x |
| RESUMEN..... | xi |
| ABSTRACT..... | xiv |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVO GENERAL..... | 3 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| HIPÓTESIS | 3 |
| REVISIÓN DE LITERATURA..... | 4 |
| Importancia del Cultivo | 4 |
| Producción Mundial..... | 4 |
| Principales Países Productores..... | 5 |
| Producción Nacional | 6 |
| Descripción del Cultivo | 8 |
| Etapas de Crecimiento y Desarrollo del Cultivo | 8 |
| Principales Plagas..... | 10 |
| Principales Enfermedades..... | 16 |
| Mejoramiento y Selección de Genotipos de Sorgo..... | 19 |
| Objetivos del Mejoramiento | 19 |
| Biología y Fisiología Reproductiva del Cultivo..... | 22 |
| Métodos de Mejoramiento para la Obtención de Variedades..... | 24 |
| Normatividad Vigente en la Producción de Germoplasma de Sorgo..... | 26 |
| Criterios y Especificaciones de Campo | 26 |
| Tolerancias de Campo | 28 |
| Criterios y Especificaciones de Laboratorio..... | 29 |
| Componentes Fitoquímicos del Grano de Sorgo | 30 |
| Compuestos Fenólicos..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Ruta del Ácido Shikímico..... | 32 |
| Flavonoides | 33 |
| Taninos Condensados | 35 |
| Antocianinas..... | 35 |
| Métodos para medir Capacidad Antioxidante (DPPH y ABTS)..... | 36 |
| Fundamento de la Capacidad Antioxidante de ABTS | 38 |
| Cálculo del Índice de Porcentaje de Inhibición IC50 | 39 |
| El Color de las Harinas | 40 |
| Escala CIELAB y CIELCh..... | 41 |
| Avances y Resultados de Investigación en Sorgo para Consumo Humano .. | 43 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 45 |
| Etapa I. Evaluación en Campo | 45 |
| Material Genético | 45 |
| Ubicación del Experimento..... | 45 |
| Preparación de las Acciones para Siembra..... | 45 |
| Manejo Agronómico | 46 |
| Variables Evaluadas..... | 47 |
| Análisis estadístico..... | 50 |
| Etapa II. Laboratorio: Propiedades cromáticas y calidad nutracéutica de granos y harinas (contenido de fenoles y flavonoides totales). | 50 |
| Material genético..... | 51 |
| Variables evaluadas | 51 |
| Análisis estadístico..... | 54 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 55 |
| Etapa I. Evaluación de Variables Agronómicas | 55 |
| Etapa 2. Laboratorio: Propiedades cromáticas y calidad nutracéutica de granos y harinas (contenido de fenoles y flavonoides totales). | 67 |
| CONCLUSIONES | 78 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 79 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Tolerancias en campo para producción de semilla de variedades de sorgo..... | 29 |
| Cuadro 2. Tolerancias en campo para producción de semilla de híbridos de sorgo | 29 |
| Cuadro 3. Criterios y especificaciones de laboratorio, para semilla de una variedad de sorgo | 30 |
| Cuadro 4. Criterios y especificaciones de laboratorio para semilla de un híbrido de sorgo..... | 30 |
| Cuadro 5. Fenoles totales, Perfil Fenólico y Actividad Antioxidante en sorgos con diferente pigmentación..... | 32 |
| Cuadro 6. Cuadrados medios del ANVA para variables agronómicas de ocho genotipos experimentales de sorgo establecidas bajo un manejo convencional. | 56 |
| Cuadro 7. Comparación de medias de las variables evaluadas en ocho genotipos experimentales de sorgo..... | 57 |
| Cuadro 8. Coeficientes de correlación lineal de Pearson para las variables evaluadas de siete genotipos experimentales de sorgo. | 64 |
| Cuadro 9. Cuadrados medios del ANVA para las propiedades cromáticas y el contenido de fenoles y flavonoides totales de líneas experimentales de sorgo | 69 |
| Cuadro 10. Propiedades cromáticas de los granos de líneas experimentales de sorgo..... | 70 |
| Cuadro 11. Propiedades cromáticas de las harinas obtenidas de líneas experimentales de sorgo..... | 71 |
| Cuadro 12. Contenido de fenoles totales y flavonoides totales en líneas experimentales de sorgo..... | 73 |
| Cuadro 13. Cuadrados medios del ANVA para el contenido de taninos condensados, antocianinas totales y capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) de líneas experimentales de sorgo | 74 |

| | |
|---|----|
| Cuadro 14. Contenido de taninos condensados y antocianinas totales en líneas experimentales de sorgo..... | 76 |
| Cuadro 15. Capacidad antioxidante de DPPH y ABTS en líneas experimentales de sorgo..... | 77 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Proyecciones y variaciones de la producción mundial de sorgo | 5 |
| Figura 2. Principales estados productores de sorgo en México..... | 7 |
| Figura 3. Esquema de la morfología floral del sorgo..... | 24 |
| Figura 4. Estructura química del Fenol | 31 |
| Figura 5. Ruta de la biosíntesis del ácido Shikímico y otros | 33 |
| Figura 6. Estructura química de los flavonoides | 34 |
| Figura 7. Estructura química del Flavan 3,4 diol y estructura general de los taninos condensados..... | 35 |
| Figura 8. Estructura general de las antocianinas | 36 |
| Figura 9. Proceso de estabilización de DPPH* | 37 |
| Figura 10. Proceso de estabilización del radical ABTS*+ | 39 |
| Figura 11. Diagrama de cromaticidad del espacio CIELAB | 42 |
| Figura 12. Diagrama de cromaticidad del espacio CIELCh | 43 |

RESUMEN

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO Y DE
PROPIEDADES NUTRACÉUTICAS DE GERMOPLASMA DE SORGO PARA
CONSUMO HUMANO

POR

FELÍCITO AUSENCIO DÍAZ VÁZQUEZ
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ANTONIO FLORES NAVEDA- ASESOR

Saltillo, Coahuila

Junio 2020

El objetivo de la presente investigación fue evaluar siete genotipos experimentales de sorgo (LES-12, LES-13, LES-17, LES-35, LES-75, LES-93 y LES-102) y un testigo comercial (híbrido), tanto en su comportamiento agronómico en campo, como en la calidad nutracéutica del grano, para definir su potencial para consumo humano.

Etapa I. Evaluación en campo. Los ocho genotipos fueron cultivados en un diseño de bloques completos al azar (3) en el Campo Experimental “Bajío-UAAAN”, ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Una vez establecido el cultivo, se seleccionaron plantas de cada genotipo, para realizar la evaluación de variables agronómicas: días a floración (DF), índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), altura de planta (AP), longitud de exersión (LE), longitud de panícula (LP), diámetro de tallo (DT), incidencia de daño por aves (IDA), enfermedades foliares (EF), grados Brix (GB), ancho de hoja (AH), longitud de hoja (LH), rendimiento en gramos por planta (RGPP) y peso de mil semillas (PMS). Con los datos obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$), asimismo se determinó el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre las variables evaluadas, para lo cual se utilizó el paquete estadístico SAS, versión 9.1.

Etapa II. Con el grano cosechado de la etapa I, se determinaron características cromáticas, contenido nutracéutico y antioxidante, a través de la evaluación de las siguientes variables: color de grano (CG), color de harina (CH), fenoles totales (FT), flavonoides totales (FVT), taninos condensados (TC), antocianinas totales (AT) y capacidad antioxidante (CA). Los datos se analizaron en un diseño completamente al azar, y se realizaron pruebas de comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$), mediante la herramienta estadística SPSS versión 21.0.

Resultados. Etapa I. Las variables DF, AP, NDVI, LE, LP, DT, IDA, EF, GB, AH, LH, RGPP y PMS no mostraron diferencias significativas entre bloques, lo que permitió detectar diferencias presentes entre genotipos, excepto para la variable Grados Brix (%) (GB). Las pruebas de comparación de medias corroboraron las diferencias estadísticas entre genotipos. Se observó que la LES-12, presentó mayor altura de planta, superior ancho de hoja, rendimiento y peso de mil

semillas, y un diámetro de tallo estadísticamente igual al testigo. Los genotipos LES-13 y LES-17 también presentaron buen potencial de rendimiento y homogeneidad en campo, confirmado por los análisis estadísticos. Se encontraron coeficientes de correlación significativos entre las variables DF y RGPP ($r = 0.711 *$) y LH y PMS ($r = 0.729 *$).

Etapa II. Laboratorio. Los resultados mostraron diferencias altamente significativas entre genotipos, para las propiedades nutraceuticas del grano. Los genotipos 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) y rojo oscuro desaturado, que incluye a LES-12 y LES-93. Las harinas presentaron un color más claro que el grano y, en consecuencia, una mayor luminosidad, implicando un menor contenido de polifenoles. El amarillo resultó ser la característica cromática más importante de las harinas de sorgo. El nivel más alto de fenoles totales se obtuvo en LES-13 (1203.96 ± 55.61 mgGAE/100 g), seguido de LES-17 (1041.41 ± 15.12 mgGAE/100 g), mientras que LES-75 y LES-35 presentaron los valores más bajos (84.77 ± 2.47 y 89.30 ± 4.06 mgGAE/100 g, respectivamente). El contenido de flavonoides totales presentó una tendencia similar al contenido de fenoles, LES-13 presentó el mayor contenido (1012.14 ± 37.23 mgCE/100 g), seguido de LES-17, LES-12 y LES-93 con valores relativamente altos (922.39 ± 26.42 , 617.33 ± 40.21 , 577.81 ± 27.46 mgCE/100 g, respectivamente). Los taninos condensados, LES-13 y LES-17 con el mayor contenido (2831.61 ± 21.17 y 2796.98 ± 23.81 mgCE/100 g, respectivamente). Los sorgos de grano rojo oscuro desaturado que incluyen a LES-12 y LES-93, presentaron los niveles más altos de antocianinas. LES-17 y LES-13 obtuvieron los niveles más altos en de capacidad antioxidante (DPPH y ABTS), mientras que LES-35 y LES-75 presentaron los valores más bajos. Los resultados indican potencial para ser usados para el consumo humano, sugiriéndose complementar con estudios bromatológicos de las líneas sobresalientes.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE AGRONOMIC PERFORMANCE AND
NUTRACEUTICAL PROPERTIES OF SORGHUM GENOTYPES WITH
POTENTIAL FOR HUMAN FOOD

BY

FELÍCITO AUSENCIO DÍAZ VÁZQUEZ
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ANTONIO FLORES NAVEDA-ADVISOR-

Saltillo, Coahuila

June 2020

The objective of this research was to evaluate a set of seven experimental sorghum genotypes (LES-12, LES-13, LES-17, LES-35, LES-75, LES-93 and LES-102) and a commercial hybrid check, in both, their agronomic performance in the field, and their grain nutraceutical quality, in order to define their potential for human consumption.

Phase I. Field evaluation. The eight genotypes were planted under a randomized complete block design, in the “Bajío-UAAAN” Experimental Field, located in the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro campus. Once the crop was established, plants of all eight genotypes were selected to evaluate the following agronomic variables: days to flowering (DF), normalized difference vegetation index (NDVI), plant height (AP), exertion length (LE), panicle length (LP), stem diameter (DT), incidence of bird damage (ADI), foliar diseases (EF), Brix degrees (GB), leaf width (AH), leaf length (LH), yield in grams per plant (RGPP) and weight of a thousand seeds (PMS). Analysis of variance and means comparison tests (Tukey $P \leq 0.05$) were performed with the data. The Pearson's lineal correlation coefficients among variables were also determined, using the SAS Software Package, version 9.1.

Phase II. With de harvested grain from Phase I, the chromatic characteristics, nutraceutical properties and antioxidant content of the grains and flours were determined, through the evaluation of the following variables: grain color (CG), flour color (CH), total phenols (FT), total flavonoids (FVT), condensed tannins (TC), total anthocyanins (AT) and antioxidant capacity (CA). The collected data was analyzed in a complete randomized design, and a Tukey ($P \leq 0.05$) means comparison test was performed, using SPSS Statistics (version 21.0).

Results. Phase I. All variables (DF, AP, NDVI, LE, LP, DT, IDA, EF, GB, AH, LH, RGPP and PMS) didn't show significant differences among blocks, allowing to detect highly significant differences among genotypes, except for GB. The means test corroborated the significant differences among genotypes. It was observed that LES-12, had higher plant height, superior leaf width, yield and a thousand seed weight, and a stalk diameter statistically similar to the check.

LES-13 and LES-17 also showed good yield potential and homogeneity in the field, as shown by the means tests. In the correlation Pearson's test, significant coefficients were found between DF and RGPP ($r = 0.711 *$) and LH y PMS ($r = 0.729 *$).

Phase II. Laboratory. Results showed significant differences among genotypes for the grain nutraceutical properties. The genotypes were classified into two groups of colors: 1) Desaturated dark orange (LES-35, LES-75, LES-17, LES-13 and LES-102); 2) y Desaturated dark red (LES-12 and LES-93). The flours had a lighter color than the grain, and in consequence brighter, implying lower polyphenols content. Yellow was the most important chromatic characteristic of the sorghum flours.

The highest phenols content was observed in LES-13 (1203.96 ± 55.61 mgGAE/100 g), followed by LES-17 (1041.41 ± 15.12 mgGAE/100 g), however LES-75 and LES-35 showed lower values (84.77 ± 2.47 y 89.30 ± 4.06 mgGAE/100 g, respectively). The total flavonoids had a similar tendency to the phenols content, LES-13 showed the highest content (1012.14 ± 37.23 mgCE/100 g), followed by LES-17, LES-12 and LES-93, with relatively high values (922.39 ± 26.42 , 617.33 ± 40.21 , 577.81 ± 27.46 mgCE/100 g, respectively). For the condensed tannins, LES-13 and LES-17 had the highest content (2831.61 ± 21.17 y 2796.98 ± 23.81 mgCE/100 g, respectively).

The desaturated dark red sorghum grain, that includes LES-12 y LES-93, presented the highest anthocyanins levels. LES-17 y LES-13 obtained the highest levels of antioxidant capacity (DPPH y ABTS), meanwhile, LES-35 y LES-75 presented lower values. The results indicate the potential to be used for human consumption, suggesting the need to carry out bromatological studies of the outstanding lines.

INTRODUCCIÓN

El sorgo es uno de los cultivos más importantes en la producción de granos en las regiones del trópico semiárido de Asia, Europa Mediterránea, Australia y África, es el quinto cereal en el mundo después del trigo, maíz, arroz y cebada (FAO, 2017). Su uso como alimento ha sido observado en más de 30 países de la franja tropical y semiárida de Asia y África, siendo la principal fuente de alimentación para más de 500 millones de personas a nivel mundial (Kumar *et al.*, 2011). En cuanto a volúmenes de producción, los principales países productores son: Estados Unidos con 15 millones de toneladas, México con 6.5 millones y Nigeria con 6 millones de toneladas anuales. Para el periodo de 2016/2017, se obtuvo una producción mundial de 63.7 millones de toneladas, la cual representa un aumento del 5.9 % en comparación al periodo anterior, generado por un incremento en los niveles de producción de Nigeria, México, Sudán, India y Etiopía, destacando una disminución en los niveles de producción de EUA. Así también, se pronosticó un crecimiento del consumo mundial en 3.8 %, esto originado por un decremento del 1.6 % del consumo forrajero y un aumento del 8.2 % en el consumo humano, industrial y para semilla (FIRA, 2016). Agronómicamente, el cultivo del sorgo presenta cualidades que le permiten una amplia adaptabilidad a las condiciones ambientales, presenta un desarrollo radicular que le permite acceder a profundidades donde existe disponibilidad de agua y donde el maíz y otros cultivos tendrían dificultad para prosperar, además, es tolerante a altas temperaturas y presenta mecanismos de preservación del contenido de agua en la planta, tales como el enrollamiento de hojas y las cubiertas cerosas en los tallos, así mismo, el grano presenta cualidades que lo hacen una alternativa viable de alimentación, debido a su alto contenido de hierro, zinc, antioxidantes, proteínas, fibra dietética y por ser un grano libre de gluten. Esta última característica hace del sorgo un cultivo ideal para la producción de harinas procesadas y alimentos. En los últimos años, el desarrollo de investigación sobre el cultivo y su potencial para el consumo humano, ha generado la obtención de algunas variedades por diferentes instituciones de

investigación, como el ICRISAT en los países africanos y asiáticos, las investigaciones del INTSORMIL, programa creado por la Universidad de Nebraska, así como el caso del CENTA en El Salvador, la Universidad Central de Las Villas de Cuba, el INIFAP en el caso de México, además de los trabajos de investigación desarrollados por la UANL, COLPOS y UAAAN. Sin embargo, los indicadores en insuficiencia alimentaria, demandan al sector agronómico y de investigación, la generación de alimentos con calidad nutricional y que cumplan con los requerimientos que cada sector de la población requiere.

Por lo anterior, la presente investigación está orientada a obtener variedades de sorgo aptas para consumo humano, evaluando en primer lugar el comportamiento de un conjunto de genotipos en campo, considerando variables agronómicas que permitan determinar el grado de homogeneidad del cultivo y a evaluar propiedades nutraceuticas del grano, indispensables para su aprovechamiento en la generación de alimentos. Por tal motivo, se presentan los siguientes objetivos e hipótesis:

OBJETIVO GENERAL

Seleccionar genotipos de sorgo para consumo humano, con base en su comportamiento en campo y en parámetros de calidad nutricional.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar el comportamiento de genotipos de sorgo, mediante variables agronómicas, bajo un esquema de manejo convencional.
2. Seleccionar los genotipos de sorgo que presenten mayor homogeneidad en campo.
3. Determinar las características cromáticas, el contenido de polifenoles (compuestos fenólicos, flavonoides, antocianinas, taninos condensados), y la capacidad antioxidante, por medio de ensayos de DPPH y ABTS, en líneas experimentales de sorgo.

HIPÓTESIS

Hipótesis Alternativa: Al menos uno de los genotipos de sorgo evaluados, presenta buen comportamiento agronómico y homogeneidad en campo, mostrando en laboratorio características cromáticas, nutracéuticas (compuestos fenólicos, flavonoides, antocianinas, taninos condensados) y capacidad antioxidante, que permitan su integración a un esquema de consumo humano.

Hipótesis Nula: Ninguno de los genotipos de sorgo evaluados, presenta buen comportamiento agronómico y homogeneidad en campo, ni características cromáticas, nutracéuticas (compuestos fenólicos, flavonoides, antocianinas, taninos condensados) y capacidad antioxidante, que permitan su integración a un esquema de consumo humano.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia del Cultivo

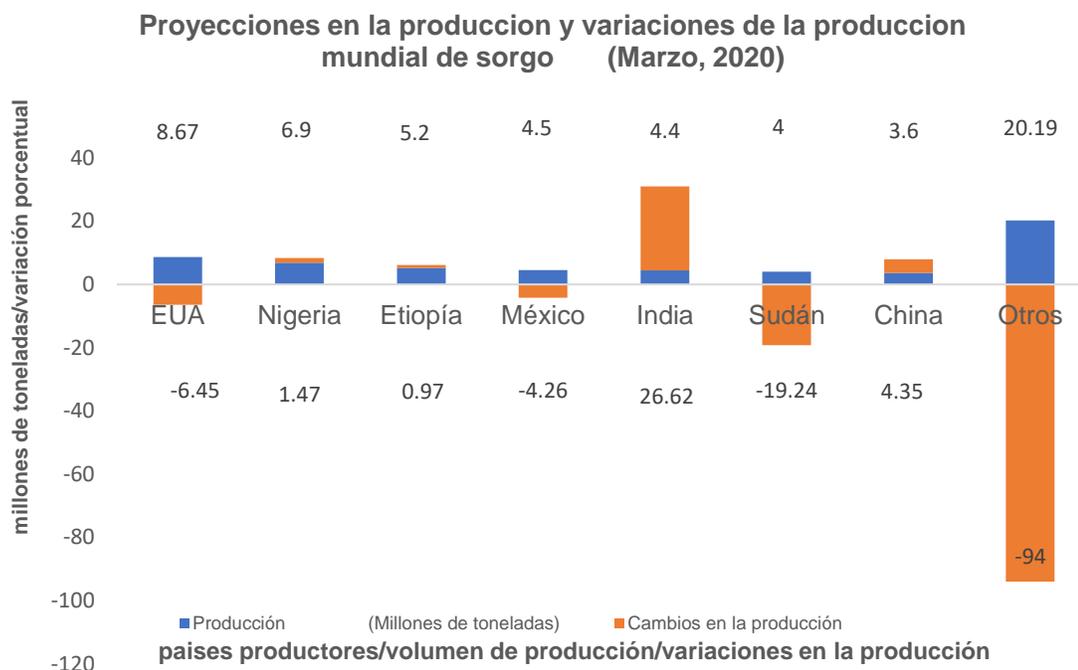
El sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es un cereal ancestral, razón por la cual ha pasado a ser considerado en la actualidad como uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial (Serna-Saldívar, 2010), siendo considerado como el quinto cereal de mayor importancia a nivel mundial, de acuerdo a sus volúmenes de producción y a su superficie cosechada (Hariprasanna y Rakshit, 2016). De esta manera y de acuerdo a lo planteado por Kumar *et al.* (2011), el sorgo es un cultivo con amplia adaptación a zonas áridas, por lo cual ha obtenido gran importancia por su establecimiento en áreas con condiciones de marginación en más de 100 países representando además una fuente de alimento para más de 500 millones de personas, las cuales padecen inseguridad alimentaria en más de 30 países de la región subtropical y semiárida de Asia y África.

Producción Mundial

De acuerdo con el Foreign Agricultural Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (FAS-USDA, 2020), para el periodo 2019/2020, los niveles de producción mundial se ubicaron en 57.46 millones de toneladas, presentando una reducción en el volumen de producción del 3.47% respecto al periodo anterior, esto influenciado por decrementos del 6.45% en el volumen de producción de EUA. La superficie sembrada en el mismo periodo, se ubica en 40.41 millones de hectáreas, lo que representa un incremento mínimo del 0.94%. Los rendimientos obtenidos en dicha proyección, alcanzan un promedio de 1.42 toneladas por hectárea, observándose una disminución respecto al ciclo anterior (2018/2019) del 4.69%, lo que sin duda impacta directamente en los volúmenes de producción proyectados, generando un impacto aditivo a las reducciones en la producción de EUA (FAS-USDA, 2020).

Principales Países Productores

En la Figura 1, se presentan los volúmenes de producción proyectados para los países con mayor producción de sorgo a nivel mundial.



*Para el cálculo de las variaciones, las cuales están expresadas en puntos porcentuales, se tomaron como referencia los volúmenes de producción obtenidos durante el ciclo 2018/2019 de acuerdo a la información presentada por FAS-USDA (2020).

Figura 1. Proyecciones y variaciones de la producción mundial de sorgo (FAS-USDA, 2020)

Las reducciones e incrementos, obedecen a contingencias ambientales y al desarrollo e investigación en el área agrícola, la cual se ha orientado a la generación de variedades e híbridos tolerantes a factores bióticos y abióticos e incrementos en el rendimiento. En este sentido, los países cuyo rendimiento (ton/ha) reflejaron decrementos fueron principalmente Australia con un 68.7%, Sudán con 19.24% y Mali con 11.56%, impactando de manera directa a la producción mundial. Es necesario mencionar como caso particular a China, cuyo rendimiento promedio (4.80 ton/ha) superó a EUA (4.58 ton/ha), lo que demuestra

los avances en investigación realizados por este país, con el objetivo de incrementar los rendimientos.

Producción Nacional

La producción nacional de sorgo para grano, ha sufrido durante los últimos años cambios en los volúmenes de producción y rendimientos, así, para el año 2017 el sorgo se ubicó en el cuarto lugar en superficie cosechada, dentro de los cultivos cíclicos y perennes de mayor importancia para México (FIRA, 2019). Para el periodo comprendido de 2007-2018, la tendencia de la superficie cosechada ha ido a la baja, presentando un decremento de 2.9% como promedio anual, y un 10.5% de decremento anual en los últimos cinco años. En el ciclo agrícola 2018, la superficie cosechada alcanzó el punto más bajo durante 24 años con 1.29 millones de hectáreas, del mismo modo, el volumen de producción presentó una disminución del 7.8%, respecto al ciclo agrícola anterior, obteniéndose un total de 4.47 millones de toneladas, siendo la producción más baja en 23 años de acuerdo a la base de datos del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON), elaborada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera a cargo de la Secretaría de Desarrollo Rural (SIAP-SADER, 2018). Estas disminuciones obedecen a la reincidencia del pulgón amarillo del sorgo en algunas regiones productoras, así como la mínima recuperación de los precios al productor (FAS-USDA, 2019).

Bajo el mismo contexto, para el año 2018, la producción nacional se concentró en siete estados, los cuales en conjunto representaron el 87.3% de la producción nacional, los volúmenes de producción se mencionan a continuación (Figura 2)

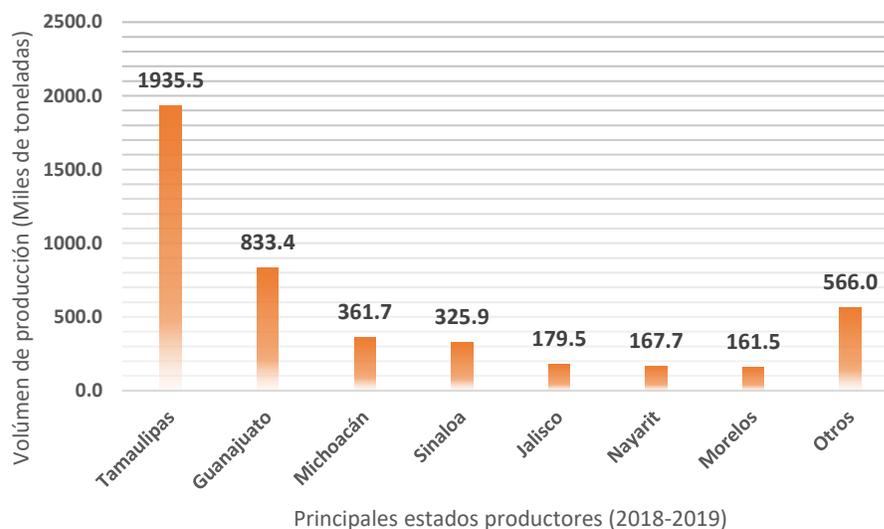


Figura 2. Principales estados productores de sorgo en México (Miles de toneladas) (FIRA, 2019).

De acuerdo a las estadísticas antes mencionadas, el estado de Tamaulipas aporta el 43.2% de la producción, seguido de Guanajuato (18.6%), Michoacán (7.7%), Sinaloa (6.5%), Jalisco (4.0%), Nayarit (3.6%) y Morelos (3.6%) (FIRA, 2019).

Según los valores proyectados por el FAS-USDA para marzo de 2020, México presenta un volumen de producción de 4.5 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 3.33 toneladas por hectárea y una superficie de 1.35 millones de hectáreas sembradas, dichos valores reflejan un decremento en la producción de 4.26%, lo que obedece a reducciones del rendimiento (ton/ha) generados en gran medida por las condiciones ambientales adversas, sobre todo en zonas de siembra bajo condiciones de temporal, además de la reincidencia de plagas como el pulgón amarillo del sorgo (*Melanaphis sacchari*).

Por otra parte, y de acuerdo a la información presentada por el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera a cargo de la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SIAP-SADER, 2020) en relación a los avances de siembras y cosechas a febrero del 2020, en México, se contaba con una superficie sembrada de 843,180 hectáreas para la producción de sorgo grano, de las cuales un total

de 1,105 hectáreas, han sido siniestradas y únicamente se habían cosechado 4,036 hectáreas, presentando un rendimiento promedio de 2.44 toneladas por hectárea. Las cifras tan bajas en cuanto a superficie cosechada se deben a que el porcentaje restante está aún en etapas de desarrollo y por lo tanto no se cuenta con información sobre los volúmenes de producción obtenidos y rendimientos promedio. Sin embargo, es importante destacar que, en relación a las proyecciones de la USDA para México, se ha sembrado el 62.22% de la superficie proyectada para el ciclo agrícola anual, esto debido a la estacionalidad de la producción en el país.

Descripción del Cultivo

Etapas de Crecimiento y Desarrollo del Cultivo

Ciampitti (2015) estructuró una fenología para el cultivo, compuesta de 10 etapas, la cual se tomó como referencia para desarrollar a continuación la fenología del cultivo, siendo complementada por lo expuesto por Gerik *et al.* (2003), Zeledón *et al.* (2007), Rao *et al.* (2008), Carrasco *et al.* (2011) y Villeda (2014).

Etapas 0: (0-10 DDE) El desarrollo del coleóptilo permite que este emerja del suelo. El crecimiento de las estructuras y tejidos de la plántula es lento. La velocidad de emergencia está determinada por las condiciones del suelo, temperatura, cubierta residual, distribución de la humedad del suelo, profundidad de siembra y vigor de la semilla, dichas condiciones deberán ser óptimas para que se lleve a cabo la germinación y emergencia.

Etapas I: (10-20 DDE) Etapa de tres hojas, en esta etapa, únicamente deben contarse las hojas que presentan un collar visible de las hojas con tejido firme en la unión de la hoja y la vaina. El punto de crecimiento está por debajo del nivel del suelo, cualquier daño al área foliar retrasará la floración.

Etapas II: (20-25 DDE) La planta cuenta con cinco hojas, las cuales se observan completamente expandidas, con la lígula completamente

desarrollada. El punto de crecimiento está aún por debajo de la superficie del suelo, comienza una fase de rápido crecimiento y acumulación de nutrientes. En esta etapa, el sistema radicular se expande y se minimiza la competencia de la planta con hierbas.

Etapa III: (30-40 DDE) Diferenciación del punto de crecimiento el cual ya se encuentra sobre la superficie del suelo, además, se define el número potencial de hojas a desarrollar por lo que se cambia el proceso de producción de hojas por la formación e iniciación de la estructura floral que inicia la etapa productiva. En esta fase, la planta alcanza tasas máximas de crecimiento y absorción de nutrientes.

Etapa IV: (40-50 DDE) En esta etapa se da la aparición de la hoja bandera, existe un acelerado alargamiento del tallo y un incremento en el área foliar. La hoja bandera se vuelve visible, de forma espiralada, además, la absorción de potasio es menor al 40%, nitrógeno menor a 30%, fósforo menor a 20%, y su crecimiento representa el 20% del crecimiento final a alcanzar en etapa de madurez.

Etapa V: (50-60 DDE) Denominada etapa de arranque, se ha alcanzado la mayor área foliar, el tamaño de la cabezuela está en su máximo potencial y el número de semillas ha sido determinado, el tallo superior conocido como pedúnculo o exersión comienza a elongarse, siendo el genotipo el que define su longitud final.

Etapa VI: (60-70 DDE) Se conoce como etapa de antesis media, se caracteriza por el crecimiento completo de la panícula y a que el 50% de las plantas de una población están en alguna etapa de floración. Para una planta individual, esta etapa ocurre cuando la floración alcanza la mitad de la panícula, dicho proceso se desarrolla de forma descendente; la acumulación de nutrientes es del 60% para fósforo, 70% para nitrógeno y

menor a 80% para potasio, el crecimiento en esta etapa alcanza un 50% en relación al tamaño final a alcanzar.

Etapa VII: (70-80 DDE) Etapa de grano masoso-lechoso, comienza la formación y llenado del grano alcanzando hasta un 50% de su peso seco; el tallo pierde peso debido a un proceso de redirección de nutrientes del tallo a los granos en formación, la prioridad en esta etapa son los granos y la panícula, por lo que un equilibrio entre las hojas (fuente de nutrientes) y los granos (receptor) puede acortar el proceso de llenado.

Etapa VIII: (80-90 DDE) Etapa de grano duro, el cual alcanza el 75% de su peso seco y la captación final de nutrientes está casi completa. Las hojas inferiores pierden funcionalidad debido al proceso de removilización de nutrientes al grano. La presencia de un estrés severo en esta etapa de crecimiento reduce drásticamente el peso final del grano.

Etapa IX: (>90 DDE) Etapa de madurez fisiológica, el grano alcanza su máximo peso seco, este proceso puede identificarse con la formación de una mancha oscura en la parte inferior del embrión; el contenido de humedad del grano es de 25% a 35%. La cosecha dependerá de las condiciones ambientales, siendo ideal cuando el grano contenga un 15% a 13% de contenido de humedad. Para acelerar el proceso de desecación pueden aplicarse desecadores después del periodo de maduración fisiológica, sin embargo, la planta aun con el grano ya cosechado, puede contener humedad y mantenerse sin hojas senescentes, mediante la característica de algunos genotipos denominada *stay-green*.

Principales Plagas

El cultivo del sorgo es susceptible de ser atacado por plagas en diferentes etapas fenológicas, por lo cual, deberá aplicarse control tanto preventivo como correctivo, así como monitoreo constante del cultivo. De acuerdo con Compton

(1990), el control de plagas debe realizarse mediante la aplicación correcta y organizada del Manejo Integrado de Plagas (MIP), el cual se conforma de la aplicación de insecticidas apropiados, uso de variedades con resistencia o tolerancia a la plaga, buenas prácticas culturales como siembra en fechas optimas con ausencia de plagas, rotación de cultivos, eliminación de plantas hospederas alternas de la plaga y un adecuado manejo de los residuos de cosecha, además sugiere el uso del control biológico y el monitoreo de la presencia de plagas y el daño que han causado al cultivo. Para el caso del sorgo, Zeledón *et al.* (2007) mencionan que las principales plagas que afectan al cultivo pueden clasificarse de acuerdo a su medio de desarrollo, ya que existen plagas que se desarrollan únicamente en el suelo y otras que llevan a cabo la mayoría de su ciclo biológico en el follaje de la planta.

Sin embargo, debido a que existe una amplia variedad de plagas tanto de suelo como del follaje que afectan al cultivo, se consideran de importancia económica a aquellas cuya incidencia produzcan efectos negativos que impacten directamente en la calidad y cantidad de la cosecha y por lo tanto generen una pérdida económica, razón por la cual a continuación se mencionan las principales plagas en el cultivo de sorgo.

Trips (*Frankliniella spp.*)

Las poblaciones de esta plaga se componen de insectos con una longitud de 1 a 1.5 mm, con dos pares de alas y antenas segmentadas, presentan una coloración amarillo claro a pardo oscuro. Las hembras de *F. occidentalis* pueden vivir hasta 30 días y en ese periodo pueden depositar de 150 a 300 huevecillos, cubiertos por el tejido vegetal (INIA, 2016). El principal daño al cultivo se da en la etapa de plántula, las cuales presentan una apariencia plateada o moteada, debido a las raspaduras y succiones que los insectos hacen en la superficie de la hoja, pudiendo generarse desecación, falta de crecimiento, clorosis y enrollamiento de las hojas (Ortega, 1987). El ciclo biológico del insecto inicia cuando el adulto oviposita sobre el cogollo de la plántula o incluso dentro del tejido de la misma, los huevecillos eclosionan en 2.5 a 4 días, posteriormente, el insecto desarrolla

dos estadios larvales de 1-2 días y 2-4 días, después de esta fase, desarrollan dos estadios como pupa de 1-2 días y 1-3 días, permaneciendo inactivos en el suelo durante el segundo estado larval después del cual pasan a la fase adulta, pudiendo encontrarse en el envés de las hojas extendidas de la plántula, en esta fase el insecto puede vivir un periodo de 30-45 días (INIA, 2016; Ortega, 1987). Para *Frankliniella spp.* no existe control biológico, aunque algunas chinches del género *Orius* se consideran enemigos naturales, no representan un método de control, debido al rápido incremento de las poblaciones de la plaga. Se recomienda el control químico, ante incrementos de la población de insectos mediante la aplicación de productos de tipo Spinosines, Avermectinas y Piretroides.

Gusano Cogollero (*Spodoptera frugiperda*)

El gusano cogollero, es un insecto nativo de las regiones tropicales y subtropicales del continente americano, es considerada una plaga de importancia económica, debido al daño que puede generar al cultivo en etapas iniciales. Prefiere el cultivo de maíz, aunque en los últimos años se ha detectado incidencia de la plaga en otros cultivos incluyendo el arroz, el sorgo, mijo, caña de azúcar y algodón (FAO, 2018). El gusano en etapas tempranas de desarrollo raspa la epidermis de las hojas para alimentarse, después el ataque es dirigido al cogollo durante las primeras etapas de crecimiento de la planta (INTA, 2017). Zeledón *et al.* (2007) mencionan que el cogollero puede atacar también en la fase de desarrollo de la panícula, y aun en formación de grano alimentándose de estos. De acuerdo a la FAO (2017), el gusano cogollero inicia su ciclo biológico mediante la postura de huevecillos por parte de una hembra adulta, la cual puede ovipositar hasta 1,000 huevecillos durante la etapa reproductiva. Al eclosionar los huevecillos, las larvas se alimentan de las plantas comiéndose las partes blandas, es en esta etapa cuando el insecto puede generar más daño. En la fase de adulto, el insecto puede vivir un promedio de 10 hasta 12 días; los huevecillos eclosionan en 3-5 días; la fase larval se compone de seis estadios y puede durar de 14 a 22 días, después de la cual se convierte en pupa, permaneciendo en ese

estadio de siete hasta 13 días, reanudando el ciclo con la expulsión de un insecto adulto.

Respecto al control, en los últimos años, el CIMMYT (2016) ha sugerido el empleo de feromonas para atraer a los machos y disminuir el índice de reproducción. Por su parte Zeledón *et al.* (2007), recomiendan la utilización de piretroides a razón de 1 l/ha en estado de plántula, en estado de desarrollo del cultivo sugiere la utilización de organofosforados como Clorpirifos etil, para un control efectivo.

Pulgón Amarillo (*Melanaphis sacchari* (Zehntner))

Zhang y Zhong (1983) reportan afectaciones del rendimiento del cultivo en áreas como China y Mongolia. Rensburg (1973) reportan pérdidas de hasta el 77% en rendimiento de grano en Sudáfrica, donde no se realizó control de áfidos. En México según el SENASICA (2014), si no se lleva a cabo ningún tipo de control, el pulgón amarillo puede afectar cultivos básicos como sorgo, caña de azúcar, y otros cereales de cultivo, presentando pérdidas que de acuerdo al SIAP (2014), que ascienden a 13 036 822.80 hectáreas de superficie sembrada con un valor de la producción de 153 727 530.26 pesos. El pulgón amarillo puede afectar al cultivo de sorgo en diferentes etapas, sin embargo, el daño económico ocurre en las etapas posteriores al desarrollo vegetativo e inicios de la etapa reproductiva. El daño ocasionado por la plaga ocurre en el área foliar, ya que el insecto succiona la savia de las hojas, generando una coloración marrón, pérdida del crecimiento y disminución del área foliar con capacidad fotosintética. Un daño indirecto causado por el pulgón es la aparición de Fumagina; además pueden ser transmisores de virus como *Sugarcane mosaic virus* (SCMV), *Sugarcane yellow leaf virus* (SCYLV) y otras enfermedades. En relación al ciclo biológico del pulgón, Voegtlin *et al.* (2003) y David (1977) mencionan que la reproducción del pulgón amarillo es predominantemente asexual, con hembras adultas ápteras y aladas que dan origen a ninfas. Hamid (1987), Teetes *et al.* (1995) y López y Fernández (1999) concuerdan en que el ciclo de vida del pulgón es de dos semanas hasta 28 días, produciendo un promedio de 96 ninfas por hembra. El insecto sobrevive el invierno en restos del cultivo y plantas hospederas alternas.

El método de control del pulgón se puede realizar de forma cultural, biológica o química. El control cultural según SENASICA (2014) deberá realizarse desde antes de la siembra, eliminando plantas o maleza hospedera, rebrotes del cultivo. De acuerdo con Rodríguez-Palomera *et al.* (2016), mencionan que el control biológico por medio de coccinélidos es eficiente, y las poblaciones de estos en ambiente normal son altas, generando un eficiente control de las poblaciones de pulgones. Según SENASICA (2019), desde el 2016 se ha llevado a cabo la introducción de enemigos naturales del pulgón como catarinas (*Coccinellidos*) y crisopas (*Chrysophas sp.*). Por otra parte, Zeledón *et al.* (2007) recomienda el uso de control químico mediante la aplicación de organofosforados y piretroides como Clorpirifos etil y cipermetrina.

Mosca de la Panoja (*Contarinia sorghicola*)

La principal afectación al cultivo se presenta en etapa reproductiva a inicio de la floración. Esta plaga en la fase de larva, se alimenta de los granos en desarrollo, ocasionando que estos no se formen, generando panículas con una apariencia estéril, en afectaciones con alta severidad, se observan poblaciones de sorgo con panículas pequeñas y compactas (Cruz y Velásquez, 2006). Díaz y Hernández (1999) reportaron afectaciones de hasta 12.8% de daño en panículas de 12 variedades de sorgos, este porcentaje fue medido en referencia al número de granos dañados por el insecto. Jiménez (1996) menciona que una sola mosca puede dañar hasta 48 granos o 1.5 g de grano en una panícula susceptible, mientras que en una panícula resistente puede dañar 9 granos o 0.32 g de grano. Zeledón *et al.* (2007) mencionan que la mosca adulta oviposita un promedio de 100 huevos en las espiguillas en floración, y al nacer la larva, se alimenta de los granos en formación. Carrasco *et al.* (2011) afirman que la forma en que la plaga afecta al cultivo es durante su fase larvaria, periodo que comprende de una a dos semanas, en las cuales, las larvas se alimentan de los granos en formación, generando espiguillas vanas, atribuyendo erróneamente a deficiencias de fertilidad o condiciones climáticas desfavorables. El ciclo de vida de la mosca del sorgo según Carrasco *et al.* (2011), es de 19 días, con un promedio de

producción de 50 a 100 huevos por mosca. Las hembras viven 1 día en promedio mientras que los machos únicamente unas horas. Los huevecillos puestos por la hembra, tardan de 40 a 60 horas en eclosionar, aunque el 50% puede eclosionar en las primeras 48 horas. La larva resultante puede sobrevivir un promedio de 7 a 9 días, pasando a un estado de pupa que puede durar de dos a tres días (Hernández, 1971).

Respecto al control de la plaga, Zeledón *et al.* (2007) proponen la eliminación de hospedantes alternos, la aplicación de piretroides con dosis de 1 L/ha antes del 30% de floración del cultivo y una segunda aplicación cuando el cultivo se encuentre en antesis media. INTA (2017) recomienda la aplicación de organofosforados como control químico correctivo. INIFAP (2014) recomienda la aplicación de Imidacloprid 70 gramos de ingrediente activo (g I.A./ha) o Clorpirifos etil (480 g I. A./ha), los cuales presentan mayor efectividad y menor residualidad y por lo tanto menor porcentaje de daño en la panoja, realizándose una aplicación por ciclo. Respecto al control biológico, Taley *et al.* (1975) mencionan al parásito calcídico *Tetrastichus sp.* (Fam. *Eulophidae*) como un insecto muy efectivo en el control de *Contarinia sorghicola*, sin embargo, no menciona en qué porcentaje. Existen algunos autores que observaron acción parasitaria de algunos insectos frente a *Contarinia sorghicola*, pero sin efecto positivo, por lo que no es factible de aplicación. INTA (2017) menciona que el principal control de estos insectos es mediante la preparación del suelo, ya que esto expone los huevecillos y larvas a la luz del sol y a depredadores. En los casos en que el insecto llegue a su estadio adulto, se recomienda la aplicación de Clorpirifos etil en dosis de dos litros en 150 litros de agua para una hectárea. Cuate-Mozo *et al.* (2016) afirman que las trampas de luz para atrapar adultos de gallina ciega contribuyen a disminuir la población en posteriores periodos productivos y puede emplearse en etapas previa a la siembra.

Principales Enfermedades

El cultivo del sorgo es susceptible a enfermedades originadas por agentes patógenos, en su mayoría hongos. A continuación, se mencionan las principales enfermedades de importancia económica para el cultivo.

Roya del Sorgo (*Puccinia sorghi*)

Zeledón *et al.* (2007) afirman que es una de las enfermedades que ataca con mayor severidad al cultivo en variedades criollas, ya que, en la mayoría de los híbridos, se han implantado genes de resistencia por medio de mejoramiento. De acuerdo al CIMMYT (2004), la roya común del sorgo, ataca con mayor frecuencia cuando la planta se acerca a la etapa de floración, generando pústulas pequeñas y polvorientas tanto en el haz como en el envés de las hojas, siendo estas de color café claro en etapas iniciales de infección, volviéndose negras cuando la planta madura. Chapke y Tonapi (2016) mencionan que las hojas inferiores son las mayormente afectadas, observándose un daño mayor en la mitad superior de la hoja, mientras la enfermedad avanza, se van infectando las hojas más jóvenes de la planta. De acuerdo a INTA (2010), *Puccinia sorghi* se disemina por medio de ecidiosporas, las cuales una vez iniciado el proceso de infección forman uredinios, cuando se presentan condiciones óptimas de 16 °C a 23 °C. Chapke y Tonapi (2016) mencionan que la roya del sorgo puede ser favorecida por condiciones de alta precipitación y humedad relativa del ambiente. El control recomendado por INTA (2010) es la siembra de variedades tolerantes o resistentes, eliminación de hospederos y la aplicación preventiva de tratamientos fungicidas como estrobirulinas y triazoles en periodos de óptimo desarrollo vegetativo. Chapke y Tonapi (2016) coinciden en el empleo de variedades con tolerancia a esta enfermedad, además recomiendan la aspersion de Mancozeb (Ditiocarbamato) al 0.2% como control químico de la roya.

Pudrición Carbonosa del Tallo (*Macrophomina phaseolina*)

Songa y Hillocks (1996) mencionan que la pudrición carbonosa del tallo es una enfermedad presente en regiones tropicales y subtropicales y que infecta a un

amplio rango de plantas silvestres y cultivadas. De acuerdo con Mihail y Taylor (1995), este patógeno puede atacar a más de 500 especies y aproximadamente 100 familias de plantas. Chapke y Tonapi (2016) mencionan que las condiciones de clima seco y altas temperaturas (35-38 °C), acompañados de escasa o nula humedad en el suelo son propicias para el desarrollo del hongo. Tuinstra *et al.* (2003) describen que el patógeno entra a la planta por la raíz, continuando por la base del tallo, generando la desintegración del tejido infectado, y con esto, secado prematuro y acame de las plantas. De acuerdo a Chapke y Tonapi (2016), la infección del cultivo en entrenudos basales, así como el agrietamiento de los mismos ocasiona una pérdida de agua importante, además mencionan que dicha infección puede provocar pérdidas de 23 a 64% en el rendimiento en grano. El patógeno puede infectar a la raíz de la planta en etapas tempranas de desarrollo, sin embargo, la enfermedad expresa la sintomatología más severa después de la etapa de floración y llenado de grano, esto debido al desbalance nutricional que sufre el tallo al redireccionar sus reservas de nutrientes hacia los granos en formación (Edmunds, 1964; Odvody y Dunkle, 1979; Vietor *et al.*, 1990). Montes-García y Díaz-Franco (2006) exponen que en el periodo de 1984 a 1994, las condiciones de altas temperaturas y sequía, generaron un incremento en la expresión de la enfermedad, generando pérdidas de 30 al 100% del cultivo. Williams-Alanís *et al.* (2009) y Moreno *et al.* (2017) recomiendan el empleo de variedades resistentes al patógeno para asegurar la disminución de pérdidas en el rendimiento.

Ergot del Sorgo (*Claviceps africana*)

Chapke y Tonapi (2016) afirman que las condiciones de bajas temperaturas durante la noche y alta humedad relativa, así como días nublados en fechas de floración favorecen el desarrollo del cornezuelo. Zeledón *et al.* (2007) mencionan que el ergotismo se presenta frecuentemente en líneas androestériles, las cuales tienen como característica solo poseer en sus flores, un órgano reproductor femenino viable, por lo tanto, representa un factor limitante en la producción de semilla híbrida de sorgo. Sin embargo, el patógeno también puede afectar a las

variedades (Chapke y Tonapi, 2016). Como síntoma, la panícula presenta una sustancia mielosa, la cual inhibe la formación del grano, el cual es sustituido por las esporas del hongo. Bandyopadhyay *et al.* (1998) afirman que el estado sexual del patógeno de la India es *Claviceps sorghi*, el de África es *Claviceps africana*; el estado asexual de ambos hongos es *Sphacelia sorghi* McRae. Chapke y Tonapi (2016) mencionan que las panículas que quedan en el campo e incluso la misma semilla puede ser fuente de inóculo para el siguiente ciclo productivo, ya que el patógeno sobrevive por medio de esclerocios infestantes. Dichos esclerocios bajo condiciones propicias germinan y producen ascosporas las cuales son dispersadas por el aire infectando los flósculos, la infección se presenta con mayor incidencia cuando la polinización no se da aun cuando los estigmas han emergido, además se afirma que los esclerocios del patógeno producen dihidroergotina, un alcaloide tóxico el cual, si es consumido por animales, puede afectar la producción de leche en ganado bovino y problemas con el peso en cerdos y bovinos. Hernández-Martínez *et al.* (2001) mencionan que la enfermedad ataca únicamente en la etapa de floración y los órganos afectados son las flores sin fecundar, pudiendo ocurrir la infección en unas cuantas o en todas las florecillas. Frederickson *et al.* (1991) estudiaron el patrón de infección de *Claviceps africana* en invernadero (10 a 30 °C de temperatura y 65 a 100% de humedad relativa). Ellos indicaron que la germinación de los conidios ocurrió 15 h después de la inoculación, y alcanzó la base del ovario al cuarto día; la colonización del ovario se presentó entre el día sexto y el octavo, para enseguida mostrar el exudado azucarado (día noveno). Chapke y Tonapi (2016) afirman que, en algunas regiones de la India, las pérdidas en rendimiento por este patógeno van desde el 10-80% dependiendo de la severidad. Zeledón *et al.* (2007) sugiere el uso de productos a base de azufre, cobre o Clorotalonil, Ditiocarbamato o Tiofanato metílico, en etapas de inicio de floración, del mismo modo Williams-Alanís *et al.* (2004) descubrieron que el empleo de híbridos con tolerancia a la enfermedad puede reducir el impacto de la misma, generándose pudriciones de menor longitud a lo largo del tallo, lo que permite a la planta

cumplir con sus actividades de transporte de nutrientes, disminuyendo los impactos negativos en el rendimiento.

Mejoramiento y Selección de Genotipos de Sorgo

El hombre depende en gran medida de las plantas para obtener sus alimentos, de forma directa o indirecta, ya que son empleadas además de proveer alimentación, en la obtención de fibras textiles, combustibles, medicamentos y materiales de construcción. Por esta razón, se ha buscado la manera de generar mejores plantas que permitan satisfacer necesidades, llegando a crear incluso métodos sistematizados de mejoramiento (Allard, 1960).

Dentro de estos cultivos se encuentra el sorgo, de acuerdo con Hariprasanna y Patil (2015), los procesos de mejoramiento de este cultivo iniciaron en 1930 en la India, obteniéndose en 1960 una diversidad de variedades obtenidas mediante la selección de líneas puras a partir de razas locales. Hariprasanna y Patil (2015) mencionan además que las primeras líneas puras obtenidas eran sensibles al fotoperiodo, de habito tardío, altura prominente y poco rendimiento, por lo que el objetivo primordial de los programas de mejoramiento en las primeras etapas estuvo orientado a mejorar esas características mediante la modificación de los genes de altura y maduración, al cruzar las líneas puras con germoplasma de Estados Unidos, obteniéndose estos resultados en 1960, sin embargo los resultados en cuanto a rendimiento se hicieron visibles cuando se obtuvo un aumento en la producción de 560 kg/ha en 1970 a 1000 kg/ha en el año 2000.

Objetivos del Mejoramiento

En todos los cultivos, los procesos de mejoramiento se van adecuando a las necesidades que el medio ambiente exige, de tal manera, que en la actualidad se han desarrollado programas de mejoramiento enfocados a objetivos específicos algunos en busca de tolerancia o resistencia a plagas y enfermedades, algunos orientados al incremento de los rendimientos y algunos otros a potencializar el contenido nutricional del cultivo. De acuerdo con Allard (1960), el incremento en los rendimientos ha sido uno de los objetivos principales

de los mejoradores, sin embargo, en algunos casos, el mejoramiento es orientado a la búsqueda de resistencia o tolerancia a enfermedades como en el trigo, propiedades nutricionales o de explotación como en la remolacha azucarera, disminución de la altura para eficientar la cosecha como en el maíz y la disminución del periodo de desarrollo y madurez como en el sorgo.

A continuación, se describen de forma general algunos objetivos del mejoramiento genético de plantas:

Rendimiento: El rendimiento está determinado por la interacción del genotipo y el ambiente, sin embargo, el potencial de rendimiento es expresado mediante funciones y características morfológicas de la planta (fenotipo), se mide en relación a un componente de rendimiento (Poehlman, 2005). Se busca plantas cuya composición morfológica total este compuesta en mayor proporción por semillas, hojas, raíces o tallos, de acuerdo a la explotación a la que se enfoque, para ello las plantas deberán ser eficientes en procesos como la fotosíntesis y fotorrespiración, aprovechando al máximo las condiciones ambientales en que se desarrollen (Vallejo y Estrada, 2002; Priyadarshan, 2019).

Precocidad: Se orienta a la búsqueda de la reducción del tiempo en que el cultivo alcanza la madurez, de tal manera que pueda escapar de las enfermedades, insectos y otros riesgos ambientales, tomando en cuenta la relación existente entre el grado de madurez, el rendimiento y la calidad del producto (Vallejo y Estrada, 2002; Poehlman, 2005). Bajo este objetivo se busca además que las especies se adapten a calendarios de producción, generando rotaciones de cultivo o incrementando el área a establecer (Priyadarshan, 2019), para determinar de manera cuantitativa la precocidad, se toman en cuenta algunas variables agronómicas, por ejemplo, el número de días a espigamiento, floración o madurez en función del cultivo (Poehlman, 2005).

Resistencia al Acame y Desgrane: El acame en cultivos es la flexión o rompimiento de estructuras como el tallo o raíz, que provocan la caída de la

planta, esto tiene como consecuencia mermas considerables en el rendimiento ya sea porque el acame sucede en etapas previas a la maduración de la semilla, la maquinaria de cosecha no logra levantar las plantas caídas o bien que estas funcionen como hospederos de enfermedades patogénicas. En estos casos el mejoramiento se enfoca en realizar modificaciones en estructuras como el tallo y el sistema radicular, de tal manera que se garantice la resistencia a condiciones ambientales como rachas de viento fuerte, caída de granizo o precipitaciones densas mediante la producción de variedades con tallos cortos y gruesos o con cierta flexibilidad, sistemas radicales bien desarrollados y tolerancia a enfermedades que debilitan estas estructuras como la pudrición carbonosa del tallo en el cultivo de sorgo. Para esta variable la medición se realiza de forma visual asignando un porcentaje de 0-100 en relación al total de plantas acamadas (Poehlman, 2005). Del mismo modo, el desgrane afecta en forma considerable, ya que en algunos cultivares, las semillas se desprenden de la panícula, antes de ser cosechadas, reduciendo el rendimiento esperado, en este caso las evaluaciones pueden realizarse observando el porcentaje de semilla desprendida de una población muestra.

Tolerancia a Plagas y Enfermedades: Se orienta a disminuir el uso de insecticidas y fungicidas empleados en el control de una plaga o enfermedad de alto impacto, así como reducir el impacto negativo en el rendimiento generado por este tipo de factores. El primer paso para realizar este tipo de mejoramiento es detectar la presencia de genes de resistencia en una diversidad de germoplasma cultivado, en algunas ocasiones estos genes son tomados de plantas silvestres emparentadas con el cultivo de interés. Para realizar pruebas sobre la resistencia de los genotipos de interés, se establecen dichos materiales y se dejan a incidencia natural del insecto o patógeno o en algunos casos, el patógeno o insecto es inoculado en las poblaciones del cultivo (Poehlman, 2005). Para el caso del sorgo, la tolerancia a insectos como *Melanaphis sacchari* se ha vuelto necesaria, debido a las reducciones que esta plaga puede ocasionar en el rendimiento y por la rápida reproducción del insecto (Webster, 1990).

Adaptabilidad: Dentro de este objetivo se consideran todas las condiciones abióticas a las que el cultivo está expuesto en las regiones donde normalmente se cultiva, de manera que pueda expresar su potencial productivo a niveles altos. Poehlman (2005) menciona que los suelos con diferentes niveles de pH, suelos salinos, suelos con presencia de metales, así como las condiciones climáticas adversas como temperaturas altas o bajas y condiciones de humedad o sequía se consideran factores de disminución del rendimiento, por lo que el mejoramiento debe estar enfocado a obtener variedades adaptadas, mediante la introducción de genes de cultivos ya adaptados y emparentados con el cultivo de interés. Allard (1960) menciona que este mejoramiento debe complementarse con cierta estabilidad del comportamiento agronómico del cultivar, ante modificaciones o variaciones de los factores abióticos.

Calidad del Producto: Bajo este objetivo se busca la obtención de productos con alto contenido nutricional, que cumplan con características físicas y químicas que le proporcionen calidad, la facilidad de elaboración de alimentos o procesamiento, así como larga vida de anaquel que permita su almacenamiento y utilización posterior (Poehlman, 2005). Dentro del mismo objetivo, en algunos casos se buscan características que el mercado exige tanto en el contenido nutricional, pero, además, algunas características físicas como el color, la forma, el sabor o tamaño del producto (Vallejo y Estrada, 2002). En la actualidad muchas investigaciones están generando variedades de sorgos orientados al consumo humano, por lo que el mejoramiento en este caso está encaminado a generar variedades con alto contenido de proteínas y demás componentes del grano (Abdelhalim *et al.*, 2019), así como en la obtención y aprovechamiento de las harinas en la producción de alimentos (Elkhalifa *et al.*, 2017; Nava *et al.*, 2017).

Biología y Fisiología Reproductiva del Cultivo

El conocimiento y comprensión de la forma en que el cultivo desarrolla su biología floral, polinización y formación de semilla determina en gran medida el éxito de

los procesos de mejoramiento, ya que los procedimientos de mejoramiento genético están determinados por el modo de reproducción del cultivo (Hariprasanna y Patil, 2015). El sorgo puede ser considerado según House (1985) con predominancia a la autogamia, presentando de un 2-10% de polinización cruzada. Por otro lado, Miller (1982) clasifica al sorgo como un cultivo con alogamia, debido a casos de polinización cruzada de hasta el 30%. Como cualquier angiosperma, la reproducción se da por medio de la floración, la cual comienza con el cambio de actividad del ápice vegetativo a floral, también denominada iniciación floral, dicho ciclo se da a los 30-45 días después de la germinación, el punto de desarrollo floral se ubica a 15-30 cm del suelo cuando la planta tiene una altura de 50-75 cm (House, 1985), posterior a este ciclo se comienza con la formación y emergencia de la panícula, esto ocurre a los 55-60 días después de la emergencia, posterior a esto y en un periodo de 8-10 días más, se completa la formación y emergencia de la panícula, 2-3 días después de la emergencia de la panícula comienza la antesis, de forma descendente, comenzando por las espiguillas sésiles, durante un periodo de 4-5 días completándose en algunas casos en 6 días, siendo la máxima floración aquella que se da a los 3-4 días después de iniciada la floración (Hariprasanna y Patil, 2015).

La polinización del cultivo podrá ser comprendida una vez que se conozca la morfología floral del sorgo (Figura 3), la cual se estructura por una inflorescencia o panícula, que a su vez se forma de racimos, cada racimo está compuesto por espiguillas sésiles (hermafroditas) fértiles y espiguillas pediceladas las cuales generalmente solo presentan anteras, y en raras ocasiones un ovario rudimentario, en las espiguillas hermafroditas, el androceo se compone de una espiral de tres estambres, las anteras están unidas a la base por un filamento largo y amarillento, el gineceo se ubica en el centro, presenta dos pistilos con un óvulo, del cual sobresale un estigma de apariencia emplumada (Aruna y Audilakshmi, 2008; Hariprasanna y Patil, 2015). Kumar (2016) menciona que la floración máxima se da entre las 6:00 y 9:00 de la mañana, periodo durante el cual las glumas se abren dejando libres a las anteras, mientras los estigmas

sobresalen mediante estilos rígidos, las anteras se flexiona cuando están secas liberando polen el cual es dispersado por el aire, así las flores permanecen abiertas por 30-90 minutos, momento en el cual el polen llega al estigma, germina el tubo polínico con dos núcleos fecundando a la ovocélula, generando un núcleo $2n$ que formara a embrión y a los núcleos polares formando un núcleo $3n$ que formara el endospermo de la semilla (Aruna y Audilakshmi, 2008; Hariprasanna y Patil, 2015, Kumar, 2016).

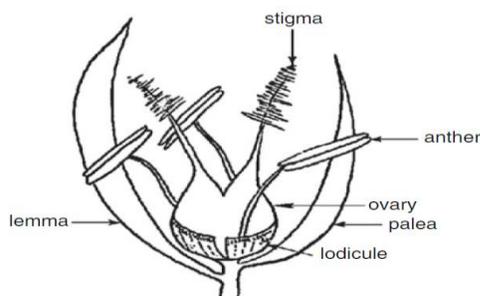


Figura 3. Esquema de la morfología floral del sorgo.

Métodos de Mejoramiento para la Obtención de Variedades

Los métodos de mejoramiento para el cultivo de sorgo dependerán del control que se tenga sobre la polinización, en el caso de este cultivo, la biología y morfología de sus estructuras florales facilitan el manejo tanto para la generación de variedades como híbridos (Kumar, 2016). Por ejemplo, para hacer autopolinización basta con cubrir con una bolsa la panoja, sin embargo, para realizar cruza, el procedimiento es un poco más complicado (House, 1985), por ello, a continuación, se describen los principales métodos empleados.

Selección de Líneas Puras: Este método consiste en realizar autopolinización, cubriendo la panoja antes de iniciar la antesis, con la finalidad de incrementar el porcentaje de homocigosis y fijar en mayor medida los caracteres genotípicos observados por medio del fenotipo, a través de selecciones recurrentes. Kumar (2016) menciona que se requiere de al menos 5 a 6 ciclos de autopolinización para lograr el nivel deseado de homocigosis de una línea pura. El mejoramiento

orientado a líneas puras generalmente está compuesto de tres pasos, en el primer paso se seleccionan un gran número de plantas a partir de una población considerada como base de diversidad genética, el segundo paso consiste en establecer en surcos las progenies de cada planta seleccionada, y finalmente el tercer paso inicia cuando el mejorador no puede realizar una selección entre las progenies desarrolladas y tiene que realizar comparaciones entre las líneas obtenidas y variedades comerciales establecidas, evaluando el rendimiento y otros caracteres de interés (Allard, 1960). El mejoramiento por selección de línea pura surge por alguna de las dos situaciones que se mencionan: 1) cuando existe la necesidad de desarrollar una variedad de una población local o 2) cuando se requiere desarrollar una variedad a partir de una población segregante (Kumar, 2016).

Selección Masal: Vallejo y Estrada (2002) mencionan que este método consiste en seleccionar en una población base, un conjunto de plantas con constitución fenotípica deseable y homogénea, la semilla de estas plantas se mezcla y de esta mezcla se obtiene la semilla para establecer nuevamente el cultivo en el siguiente ciclo, en el cual se realizara nuevamente la selección, y del mismo modo en los ciclos posteriores hasta que la población presente la homogeneidad deseada. Allard (1960) menciona que la principal diferencia entre la selección de líneas puras y la selección masal, es que en este caso no se obtiene una sola línea pura, sino que se mantienen la mayor parte de las líneas seleccionadas, además este método mejora con mayor rapidez y seguridad un germoplasma local.

Método de Pedigree: De acuerdo con Allard (1960), este método consiste en la selección de plantas superiores de una población segregante durante ciclos sucesivos, durante los cuales se van guardando registros sobre el avance fenotípico de las nuevas progenies respecto a los parentales. Este método parte de una generación F2 resultado del establecimiento de un híbrido, esto permite obtener progenies con mejor fenotipo que los progenitores, mediante la

segregación. Por ello este método se compone de dos etapas, la primera consiste en la selección y cruzamiento de progenitores y la segunda en el manejo de los híbridos y sus segregantes, siendo esta etapa la que requiere de mayor tiempo (Vallejo y Estrada, 2002).

Obtención de Variedades Mejoradas

Bajo los métodos mencionados, es posible después de 6 ciclos de autofecundación y selección de plantas con características fenotípicas deseables (Kumar, 2016) obtener una variedad, la fijación de la homocigosis dependerá del número de ciclos que se lleven a cabo. Estas variedades obtenidas podrán ser empleadas como tal o integrarlas a programas de mejoramiento orientado a la obtención de híbridos (Poehlman, 2005).

Normatividad Vigente en la Producción de Germoplasma de Sorgo

Criterios y Especificaciones de Campo

De acuerdo a lo establecido en el artículo tercero de la Ley Federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas, una semilla debe presentar los atributos de calidad física, fisiológica, genética y sanitaria. Estos atributos son requeridos y aplicables al menos en el marco regulatorio a aquella semilla destinada para su comercialización. Sin embargo, dentro de los programas de mejoramiento manejados tanto a nivel institucional como de la iniciativa privada, el germoplasma empleado deberá presentar estos atributos con la finalidad de que los experimentos que se realicen, no presenten variaciones y si estas existieran, fueran producto del proceso de mejoramiento del cultivo (atributo genético) y no por cuestiones propias de la semilla (atributos físico, fisiológico y sanitario). Estos últimos atributos son obtenidos mediante el manejo agronómico y son observables al finalizar el ciclo en el momento de la cosecha, sin embargo, el atributo relacionado a la calidad genética, dependerá de las medidas de aislamiento empleadas en la producción de la semilla y es observable hasta que se lleve a cabo el establecimiento del siguiente ciclo de producción o

mejoramiento. Para el caso del sorgo, los lineamientos que permiten asegurar la calidad genética del germoplasma están definidos en la Regla para la Calificación de Semillas de Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), elaborada por el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS) en el 2018.

Aislamiento

De acuerdo a esta regla, los aislamientos se adecuarán en relación al tipo de semilla que se desea obtener, por lo que existen lineamientos específicos para la obtención de semilla de una variedad como de un híbrido.

De esta manera, en relación a la producción de semilla de una variedad, como regla general se tiene que no deberá establecerse el cultivo de sorgo en parcelas donde se haya establecido dicho cultivo ya sea bajo una categoría o variedad diferente. En relación a los aislamientos, estos estarán determinados por la categoría de la semilla, de tal manera que, para semilla dentro de las categorías Básica y Registrada, la distancia mínima de aislamiento del lote de producción respecto de otros lotes debe ser de 500 metros, y para semillas dentro de las categorías Certificada y Habilitada, deberá ser una distancia mínima de 300 metros.

Para el caso de la producción de semilla híbrida, la regla sobre el establecimiento en parcelas empleadas con anterioridad para el mismo fin es aplicable, a menos que se cuente con alguna autorización por parte de la autoridad competente, además debe evitarse la siembra en parcelas donde se haya establecido con anterioridad algunas de las especies como zacate Sudán o zacate Johnson.

Respecto a los aislamientos en la producción de híbridos, para semilla en categoría básica, la distancia mínima de aislamiento respecto a otras parcelas con el mismo cultivo o algunas subespecies deberá ser de 1000 metros, para semilla en categoría certificada o habilitada la distancia mínima de aislamiento es de 300 metros.

Para los casos en que la semilla es germoplasma experimental, el establecimiento deberá adecuarse a alguna de las categorías mencionadas, de preferencia aplicar los lineamientos para semilla certificada o básica.

Inspecciones

Para el caso de variedades las inspecciones, deberán aplicarse a semillas calificadas, realizándose un total de dos visitas, la primera en etapa de floración, de preferencia al inicio para comprobar el aislamiento y la segunda, antes de la cosecha después de que la semilla comience a tomar el color característico de la madurez, esto con la finalidad de verificar sanidad de semilla y las características varietales.

Para el caso de los híbridos se aplican las mismas reglas, solo que la primera visita debe realizarse sin previo aviso al productor y la segunda una vez que el productor haya dado aviso al SNICS, siempre y cuando la semilla se encuentre en madurez fisiológica.

Tolerancias de Campo

Al igual que en los casos de aislamiento e inspecciones, la tolerancia de plantas fuera de tipo y demás especificaciones presentan variaciones para variedades o híbridos, por lo que a continuación se describen en los Cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Tolerancias en campo para producción de semilla de variedades de sorgo (SNICS,2018)

| Factor | Categoría de semilla | | | |
|---|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Básica | Registrada | Certificada | Habilitada |
| Plantas de tipo dudoso (máximo) | 0 | 1 en 10,000 | 1 en 1,000 | 2 en 1,000 |
| Plantas fuera de tipo (máximo) | 0 | 1 en 35,000 | 1 en 20,000 | 1 en 20,000 |
| Plantas de otros cultivos | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Plantas de maleza | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Panojas completas afectadas por tizón (<i>Fusarium moniliforme</i>) | 0 | 0 | 1 en 10,000 | 1 en 10,000 |
| Panojas con algunos granos con tizón (<i>Fusarium moniliforme</i>) | 0 | 2 por ha. | 4 por ha. | 6 por ha. |

Cuadro 2. Tolerancias en campo para producción de semilla de híbridos de sorgo (SNICS, 2018)

| Factor | Básica | | Habilitada |
|--|-------------|-------------|-------------|
| | Registrada | Certificada | |
| Plantas de otros cultivos | 0 | 0 | 0 |
| Plantas de maleza | 0 | 0 | 0 |
| Panojas de otras variedades | 1 en 50,000 | 1 en 50,000 | 1 en 20,000 |
| Panojas de tipo dudoso | 1 en 20,000 | 1 en 20,000 | 1 en 1,000 |
| Granos con tizón (<i>Fusarium moniliforme</i>) | 0 | 0 | 1 en 2,500 |

Criterios y Especificaciones de Laboratorio

A nivel laboratorio las tolerancias también difieren en relación al tipo de semilla que se esté manejando, por lo que a continuación se muestran las tolerancias definidas para variedades e híbridos.

Cuadro 3. Criterios y especificaciones de laboratorio, para semilla de una variedad de sorgo (SNICS, 2018).

| Factor | Categoría de semilla | | | |
|---------------------------------------|----------------------|-------------|-------------|--------------|
| | Básica | Registrada | Certificada | Habilitada |
| Semilla pura, mínimo (%) | 99 | 98 | 97 | 95 |
| Materia inerte, máximo (%) | 1 | 2 | 3 | 5 |
| Semillas de otros cultivos, máximo | 1 en 10,000 | 3 en 10,000 | 7 en 10,000 | 10 en 10,000 |
| Semillas de otras variedades (máximo) | 1 en 20,000 | 1 en 10,000 | 1 en 2,000 | 5 en 2,000 |
| Semillas de maleza | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Germinación, mínimo (%) | 85 | 85 | 85 | 80 |
| Humedad, máximo (%) | 13 | 13 | 13 | 13 |

Cuadro 4. Criterios y especificaciones de laboratorio para semilla de un híbrido de sorgo (SNICS, 2018).

| Factor | Categoría de semilla | | |
|---------------------------------------|----------------------|-------------|--------------|
| | Básica | Certificada | Habilitada |
| Semilla pura, mínimo (%) | 99 | 97 | 95 |
| Materia inerte, máximo (%) | 1 | 3 | 5 |
| Semillas de otros cultivos, máximo | 0 | 7 en 10,000 | 10 en 10,000 |
| Semillas de otras variedades (máximo) | 0 | 1 en 10,000 | 10 en 10,000 |
| Semillas de maleza nociva | 0 | 0 | 0 |
| Germinación, mínimo (%) | 80 | 80 | 78 |
| Humedad, máximo (%) | 13 | 13 | 13 |

Componentes Fitoquímicos del Grano de Sorgo

En cultivos como el sorgo, existen componentes fitoquímicos como los compuestos fenólicos (fenoles simples, flavonoides y taninos) los cuales son empleados como defensa natural ante plagas y fitopatógenos, las mayores concentraciones de estos compuestos se ubican en el pericarpio del grano, estos compuestos han sido estudiados por su capacidad antioxidante y potencial benéfico a la salud (Serna-Saldívar y Espinoza-Ramírez, 2019) Los compuestos fenólicos se dividen en ácidos fenólicos (subclasificados en derivados del ácido benzoico y ácido cinámico) y flavonoides dentro de los cuales se encuentran los taninos y las antocianinas (Awika y Rooney, 2004).

Compuestos Fenólicos

Los compuestos fenólicos son sustancias químicas integradas por un anillo aromático, un anillo de benceno y uno o más grupos hidróxidos dentro de los que se incluyen derivados funcionales (ésteres, metil ésteres, glicósidos, etc.) (Tsimidou, 1998).

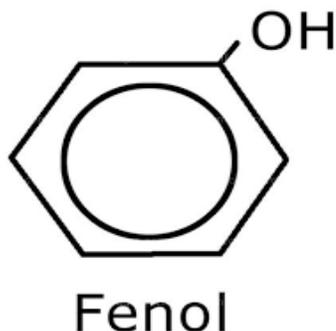


Figura 4. Estructura química del Fenol

Los compuestos fenólicos conforman los principales metabolitos secundarios de las plantas, la cantidad y calidad de los mismos está determinado a nivel genético por el cultivo, sin embargo, también están relacionados con el ambiente. Son empleados como fitoalexinas como defensa ante plagas y enfermedades además de generar pigmentaciones en algunas estructuras de las plantas (Gimeno, 2004) Para el caso del sorgo, el contenido total de fenoles es posible determinarlo con el método de Folin-Ciocalteu, dicho contenido dependerá de la variedad y color del pericarpio (Serna-Saldívar y Espinoza-Ramírez, 2019). Los sorgos pigmentados, especialmente los de pericarpio oscuro, presentan contenidos más altos de ácidos fenólicos en relación a los sorgos sin pigmentación del pericarpio (Waniska *et al.*, 1989).

Los compuestos fenólicos, perfil fenólico y actividad antioxidante para granos de sorgo con diferentes pigmentaciones se presentan a continuación en el Cuadro 5, el primer dato es el contenido promedio y el dato en paréntesis es el rango en el que es posible encontrar al componente.

Cuadro 5. Fenoles totales, Perfil Fenólico y Actividad Antioxidante en sorgos con diferente pigmentación (Serna-Saldívar y Espinoza-Ramírez, 2019) ^a

| Componente | Pigmentación del grano de sorgo | | | |
|---|---------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | Blanco | Rojo | Obscuro | Negro (Alto tanino) |
| Fenoles | 1.77 (1.5-2.6) | 3.2 (2.3-3.6) | 12.0 (5.3-19.8) | 4.57 (2.6-12.0) |
| Flavonoides | 0.59 (0.3-1.0) | ... | 1.96 | 2.83 (1.5-4.0) |
| Antocianinas | ... | 0.7 | 2.6 (2.3-2.8) | 1.2 (1.0-1.3) |
| Taninos | 0 | ... | ... | 38.9 (17.3- 85.9) |
| Componentes Fenólicos (µg/g) | | | | |
| p-Ácido Hidroxibenzoico | 20.0 (15.4-25.9) | 24.2 (16.8-33.5) | ... | ... |
| Ácido vanílico | 62.8 (8.3-126.7) | 20.9 (12.4- 50.7) | ... | ... |
| Ácido Cafeico | 30.6 (23.3- 42.7) | 16.8 (1.5- 52.1) | ... | ... |
| Ácido Felúrico | 219.3 (157.2- 342.6) | 351.5 (104.6-456.1) | ... | ... |
| Ácido Gálico | 14.0 (0.0- 23.5) | 36.1 (26.1- 46.0) | ... | ... |
| Ácido protocatecuico | 123.6 (19.5- 228.0) | 59.9 (23.8- 96.0) | ... | ... |
| Ácido cinámico | 2.9 (0.0- 9.4) | 15.2 (10.7- 19.7) | ... | ... |
| Ácido sirínico | ... | 21.2 (19.3- 23.2) | ... | ... |
| Ácido Sinápico | ... | 2.3 (1.2-4.4) | ... | ... |
| 3- Deoxiantocianinas (µg/g) | | | | |
| Luteolinidina | ... | 4.8 (1.3- 7.9) | 167.1 (9.1- 389.8) | ... |
| Apigeninidina | ... | 11.2 (3.4- 16.8) | 208.3 (116.2- 376.1) | ... |
| 5- Metoxi- Luteolindina | ... | 5.5 (1.4-9.7) | 101.3 (5.5- 196.5) | ... |
| 7- Metoxi-Apigeninidina | ... | 18.4 (4.0- 28.6) | 95.4 (59.8- 168.2) | ... |
| Flavonas (µg/g) | | | | |
| Luteolina | ... | 4.8 (1.3- 7.9) | 22.6 (5.9- 48) | ... |
| Apigenina | ... | 7.1 (5.6- 9.3) | 5.8 (3.4- 12.3) | ... |
| Flavonones (µg/g) | | | | |
| Eriodictiol | ... | 58.8 (45.0- 72.5) | 59.0 (50.5- 66.0) | ... |
| Naringenina | ... | 82.9 (71.0- 86.5) | 43.8 (38.0- 53.1) | ... |
| Actividad antioxidante (Equivalentes µMol Trolox/Muestra de grano, DB) | | | | |
| ORAC^b | 22 | 14 | 220 | 870 |
| ABTS^c | 6 | 53 | 57 | 226 |
| DPPH^d | 6 | 28 | 41 | 202 |

^a Con información de Awika and Rooney (2004), Dykes *et al.* (2013), Guajardo-Flores (2008), Hahn *et al.* (1983), Khoddami *et al.* (2015), and Wu *et al.* (2016).

^b Capacidad de absorción de oxígenos radicales.

^c 2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico).

^d 2,2-difenil-1-picrylhidrazyl.

... Sin datos

Ruta del Ácido Shikímico

La ruta del ácido Shikímico está relacionada con el metabolismo de carbohidratos y aminoácidos aromáticos, dicha vía consta de siete etapas (Figura 5). El proceso

comienza con la condensación de fosfoenolpiruvato eritrosa-4-fosfato, la condensación y etapas posteriores conducen a la formación de ácido Shikímico y culminan con la síntesis de ácido corísmico. Algunas formas activas con la coenzima A (CoA) permiten la obtención de algunos de los principales compuestos fenólicos, el ácido gálico, por ejemplo, en combinación con azúcares es precursor de taninos condensables.

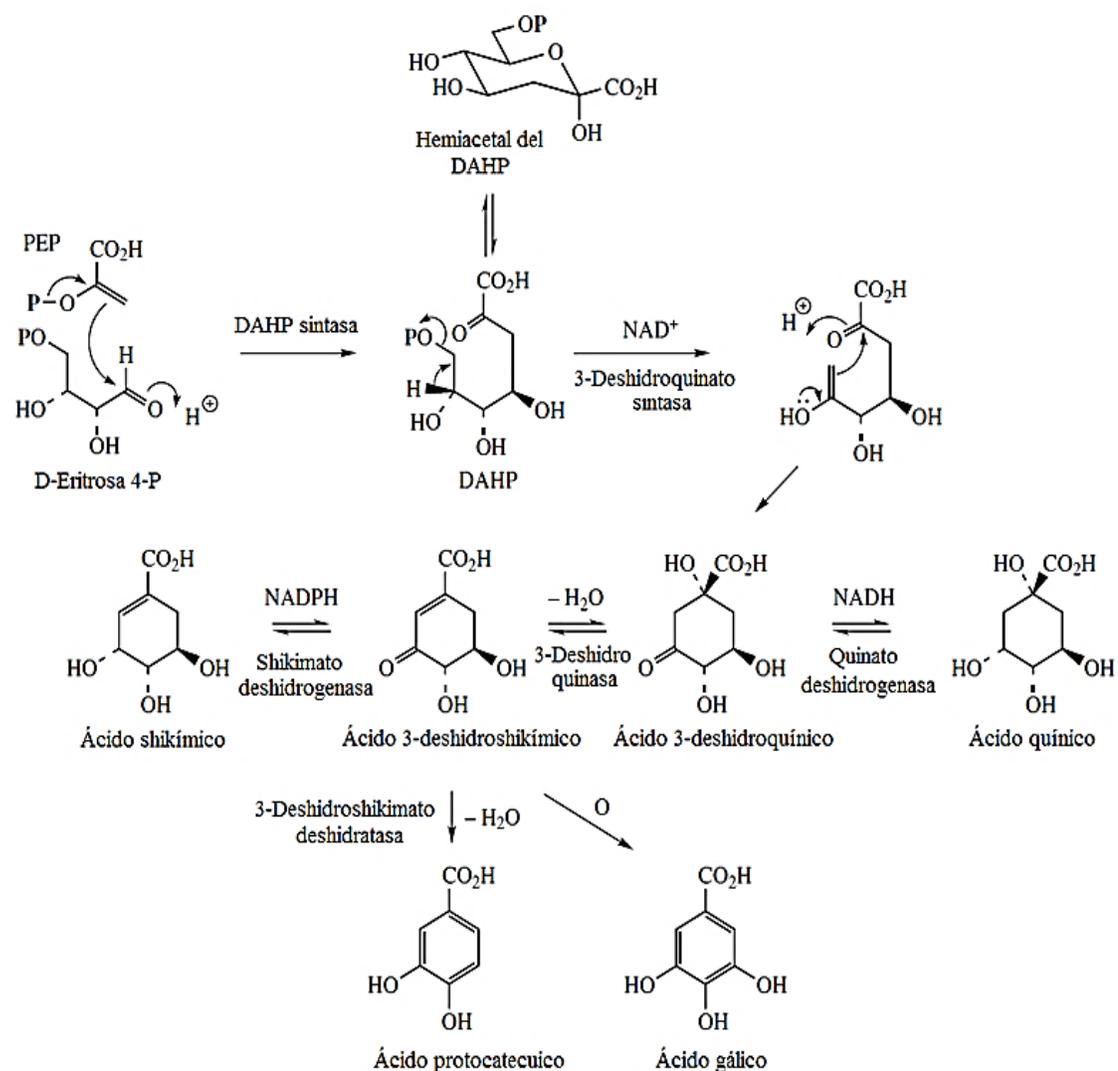


Figura 5. Ruta de la biosíntesis del ácido Shikímico y otros

Flavonoides

De acuerdo con López (2002), los flavonoides son compuestos fenólicos diaril-propánicos con estructura $\text{C}_3\text{-C}_6\text{-C}_3$, con dos anillos aromáticos unidos mediante

una cadena de 3 carbonos, ciclada a través de un oxígeno (Figura 6). Los anillos se sintetizan de la ruta de los policétidos (A) y del ácido Shikímico (B y C₃). Son sustancias sólidas cristalizadas de color blanco o amarillenta, se oxidan muy rápidamente confiriendo efecto antioxidante. En el organismo humano esta última característica les permite reducir la peroxidación lipídica, resistencia vascular y efecto antimutagénico e inhibición de enzimas. En el sorgo los flavonoides se derivan del polifenol monomérico Flavonor y se les llama antocianidinos, los flavonoides con mayor abundancia en el grano de sorgo son los luteoferoles y apiforoles (FAO, 1995)

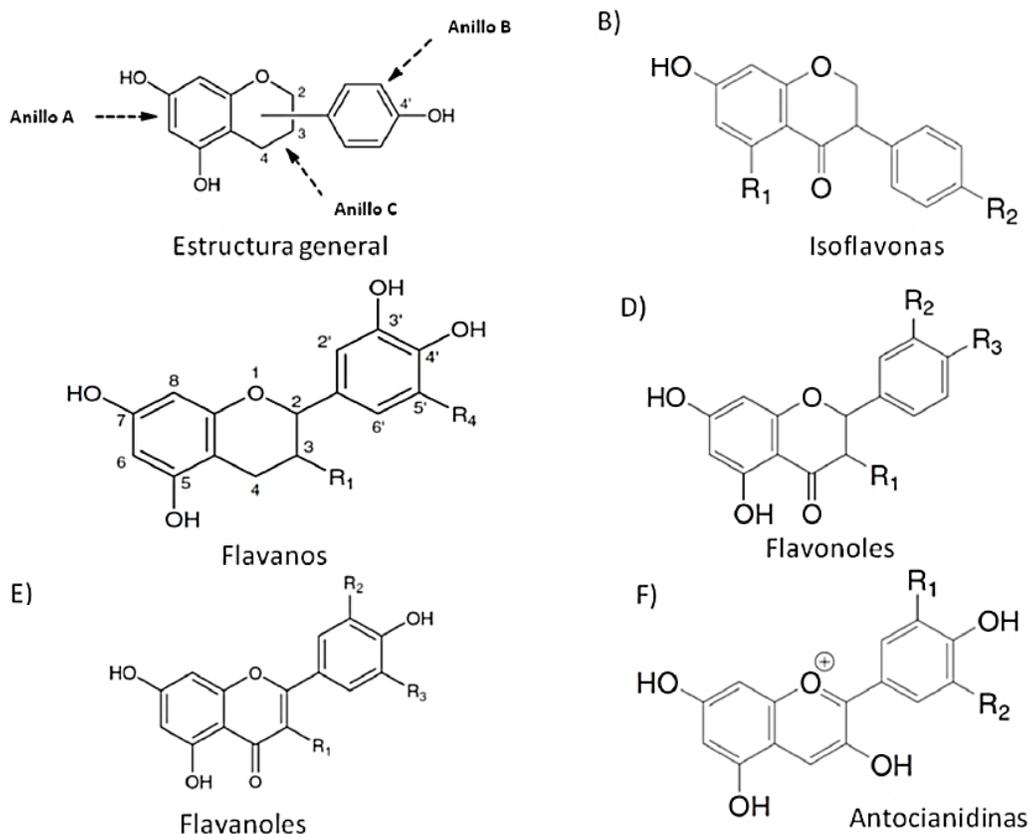


Figura 6. Estructura química de los flavonoides

Taninos Condensados

De acuerdo con Álvarez y Lock (1992), estos compuestos son derivados de Flavan 3,4- dioles (Figura 7) (leucoantocianidinas y proantocianidinas monómeras), llamadas también proantocianidinas condensadas. En la planta cumplen funciones de protección, ante ataques de insectos y enfermedades provocadas por fitopatógenos. Serna-Saldívar (2010) menciona que, en el sorgo, las concentraciones de taninos condensados confieren al grano capacidad antioxidante al ser consumido, sin embargo, existen evidencias de algunas desventajas como la baja asimilación de proteínas, disminución de la actividad enzimática ligada a la digestión y en general disminución del potencial alimenticio del grano.

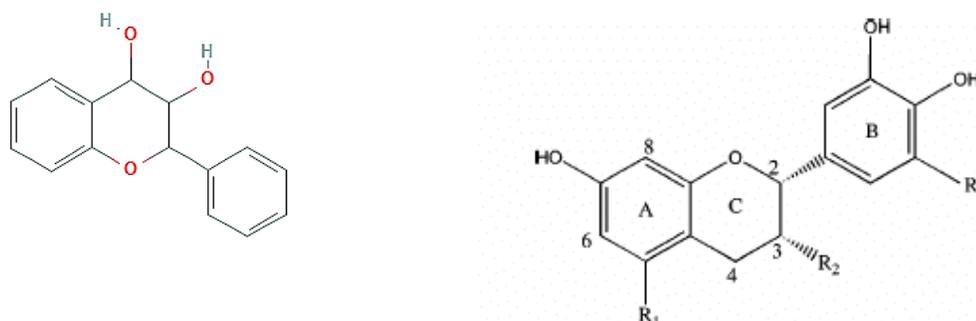


Figura 7. Estructura química del Flavan 3,4 diol y estructura general de los taninos condensados

Antocianinas

A nivel químico, las antocianinas se estructuran por una molécula de antocianidina (aglicona) unida a un azúcar a través de un enlace β -glucosídico (Figura 8). La estructura química básica de las agliconas es el ion flavilio, conocido de otra manera por 2-fenilbenzopirilio el cual consta de dos grupos aromáticos: A) Benzopirilios y B) Anillos fenólicos (Wong, 1995; Badui, 2006).

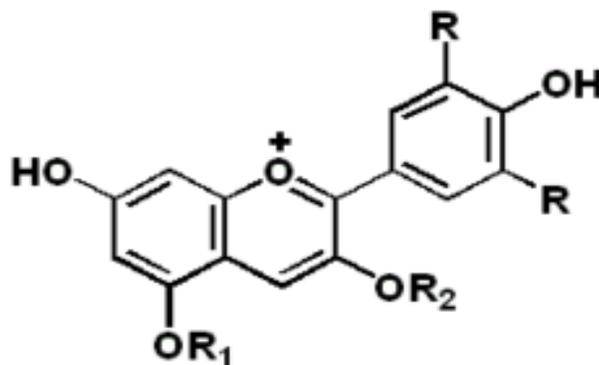


Figura 8. Estructura general de las antocianinas

De acuerdo con Brouillard (1982), las antocianinas pueden encontrarse en diferentes partes de una planta desde las raíces hasta en las flores y frutos. A nivel celular y dependiendo de la planta, estos compuestos pueden ubicarse disueltos de manera uniforme en la solución vacuolar de células epidérmicas, sin embargo, en algunos casos se ubican en regiones específicas de las vacuolas, denominándose en este caso antocianoplastos (Pecket y Small, 1980). En los últimos años, se ha realizado investigación en relación a las propiedades de estos compuestos, debido a que recientes estudios han observado cualidades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas, descubriéndose altos contenidos de las mismas sobre todo en genotipos de sorgos y maíces con pigmentaciones rojizas u oscuras (Awika *et al.*, 2005; INIFAP, 2012; Choi *et al.*, 2019)

Métodos para medir Capacidad Antioxidante (DPPH y ABTS)

Dentro de la diversidad de métodos empleados para determinar la actividad antioxidante de un extracto, existen algunos basados en la transferencia de átomos de hidrogeno (THA) en los cuales se mide la capacidad de un antioxidante para estabilizar un radical libre mediante transferencia de átomos de hidrógeno, por otro lado los métodos basados en la transferencia de electrones (TE) determinan la capacidad del antioxidante mediante la capacidad de este en

trasferir un electrón y reducir un compuesto. La combinación de estos métodos permite la generación de métodos como el DPPH y ABTS.

DPPH (Difenil Picril Hidrazilo): En este método se emplea el radical libre 2,2-difenil-1-picrihidrazilo (Figura 9). Fue propuesto por Brand-Williams *et al.* (1995), con la intención de reducir el tiempo y hacer más práctico el procedimiento de evaluación de capacidad antioxidante. De acuerdo con lo expuesto por Londoño (2012), el DPPH^{*} es uno de los pocos radicales orgánicos que se mantienen estables, el radical presenta una coloración violeta intensa.

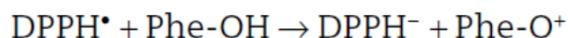
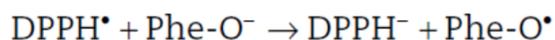
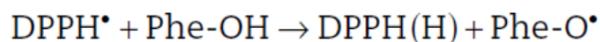
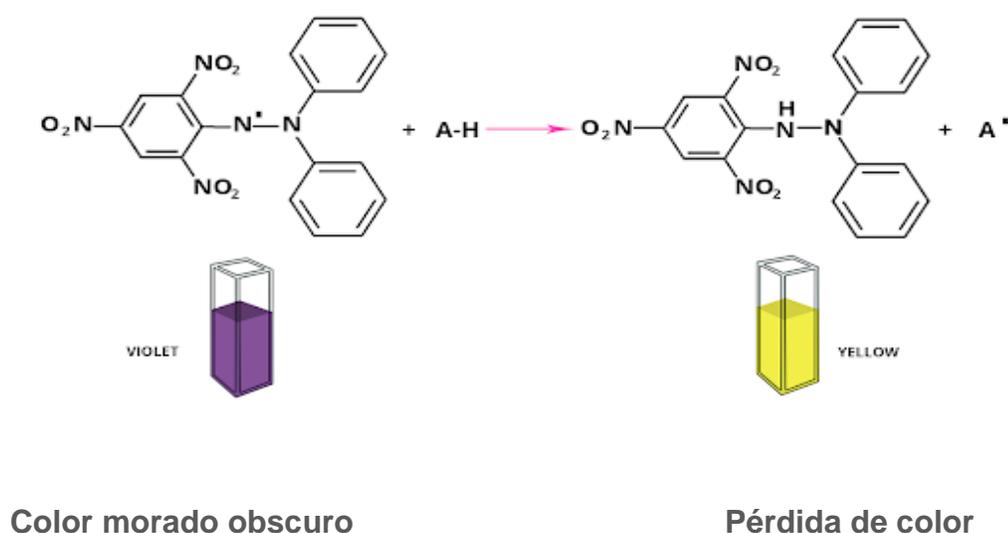


Figura 9. Proceso de estabilización de DPPH^{*}

El método se fundamenta en la estabilidad del radical libre, dada por el un electrón desapareado de un átomo de nitrógeno que genera una coloración

intensa y que se pierde al ser estabilizada por una sustancia capaz de donar un hidrógeno (H) o un radical (R) para generar una forma reducida de DPPH-H o DPPH-R, la coloración cambia a color amarillo disminuyendo la absorbancia a 515 nm (Mishra *et al.*, 2012; Alam *et al.*, 2013; Londoño, 2012).

ABTS (azinobis 3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico): Este método permite evaluar la capacidad de un antioxidante mediante la capacidad de estabilizar el catión pigmentado ABTS^{•+}, el cual se origina de la oxidación previa del ABTS (2,2'-azinobis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico)) (Figura 10), dicho método fue desarrollado en un principio por Miller *et al.* (1993) con la finalidad de medir la capacidad antioxidante en bebés prematuros. Por su parte Re *et al.* (1999) y Kuskoski *et al.* (2004), llevaron a cabo la extracción del radical ABTS^{•+} mediante la reacción de ABTS (7 ml) con persulfato potásico (2.45 ml, incubados a temperatura ambiente (± 25 °C) en obscuridad por 16 horas. Una vez obtenido el radical ABTS^{•+}, se diluye con etanol para obtener un valor de absorbancia de 0.70 (± 0.1) a 754 nm como longitud de onda de máxima absorción.

Fundamento de la Capacidad Antioxidante de ABTS

La técnica mejorada para la generación del radical catión ABTS^{•+}, implica la producción directa del cromóforo ABTS^{•+} verde-azul a través de la reacción entre ABTS y el persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$), durante un periodo de 12 h (Huang *et al.*, 2005). Este presenta tres máximos de absorción a las longitudes de onda de 645 nm, 734 nm y 815 nm. La adición de los antioxidantes al radical preformado lo reduce a ABTS. De esta manera el grado de decoloración como porcentaje de inhibición del radical catión ABTS^{•+} está determinado en función de la concentración y el tiempo; así como del valor correspondiente usando el Trolox como estándar, bajo las mismas condiciones (Pisoschi y Negulescu, 2011).

El método espectrofotométrico basado en la disminución de la absorbancia del radical catión ABTS, se aplicó a la determinación del contenido de antioxidantes en extractos de fruta de guayaba, utilizando una curva estándar lineal entre 25 y 600 μM de Trolox (Thaipong *et al.*, 2006). El ensayo ABTS, como un radical

centrado en nitrógeno y estéricamente impedido, no es un buen modelo para radicales pequeños altamente reactivos, por ejemplo: OH, NO, y O₂, que están activos en tejidos biológicos y alimentos. Sin embargo, las ventajas que aporta el método ABTS es que puede ser utilizado para antioxidantes hidrofílicos y lipofílicos, compuestos puros y extractos de alimentos. Además, la generación química del radical es directa, sin participación de un intermediario, y están bien establecidas las estabilidades tanto del ABTS^{•+} como de las reacciones que lo generan (Arnao *et al.*, 2001).

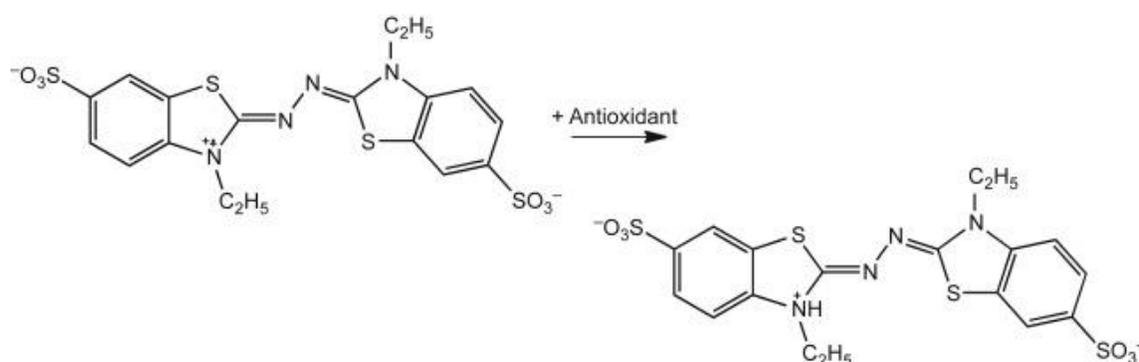


Figura 10. Proceso de estabilización del radical ABTS^{•+}

De acuerdo con Londoño (2012), las ventajas de este método son que puede ser empleado en una amplia variedad de alimentos, permitiendo hacer comparaciones entre estos, además de que puede ser aplicado en una amplia gama de pH's y fuerzas iónicas, por otra parte, el ABTS^{•+} es soluble en medios acuosos y orgánicos, permitiendo la evaluación de antioxidantes de tipos hidrofílicos e hidrofóbicos.

Cálculo del Índice de Porcentaje de Inhibición IC₅₀

Dentro del procedimiento para medir la capacidad antioxidante por la técnica DPPH, se requiere del cálculo de la IC₅₀, definida como la concentración de la muestra problema capaz de producir una inhibición del 50% del radical libre DPPH, esto debido a que generalmente en la determinación de la capacidad

antioxidante con la técnica DPPH, se han empleado diferentes concentraciones haciendo poco fiable el procedimiento (Guija-Poma *et al.*, 2015)

De acuerdo con Rodríguez *et al.* (2015), el IC50 puede calcularse mediante regresión lineal o por medio de la ecuación de la recta de cada muestra o patrón de referencia analizado =ácido ascórbico y rutina para el método DPPH y ácido ascórbico, rutina y Trolox para la prueba ABTS^{•+}. La manera de calcular dicho valor es sustituyendo el valor de Y en la ecuación por 50, obteniéndose de esta manera la concentración, o de otro modo, mediante el análisis de regresión del porcentaje de captación de DPPH o porcentaje de inhibición de ABTS^{•+} comparada contra la concentración necesaria de extractos para inhibir el 50% del radical DPPH[•] y ABTS^{•+}. Del mismo modo, Villanueva-Tiburcio *et al.* (2010) mencionan que el IC50 puede determinarse mediante un análisis de regresión del porcentaje de remanente contra la concentración necesaria de los extractos para inhibir el 50% del radical DPPH[•]. Bajo este método el porcentaje del remanente del radical DPPH[•] se calcula mediante la ecuación:

$$\%DPPH_{REM} = \frac{(DPPH)_f}{(DPPH)_i} \times 100$$

Donde (DPPH)_f es la absorbancia del radical DPPH al final de la reacción, mientras que (DPPH)_i es la absorbancia del radical al inicio de la reacción.

El Color de las Harinas

En la industria de alimentos, el color de estos presenta un impacto tan valioso como el sabor, resultando atractivo o no al consumidor. A nivel de investigación el conocimiento sobre el color de un producto, extracto, jugo o harinas permite relacionar dicha característica con otras propiedades como el contenido de taninos, antocianinas y otros componentes fitoquímicos. Sin embargo, el nivel de percepción respecto al color varía de un observador a otro, por lo que el procedimiento para definir un color para cierto producto debe establecerse mediante un procedimiento cuantitativo y no por medio de la observación, de tal

manera que puedan delimitarse los valores numéricos que corresponden al color verdadero del producto analizado dentro de un espacio o escala numérica dimensional. Uno de los descubrimientos de relevancia para el estudio del color lo reporto Munsell (1905) al identificar los tres atributos básicos del color: tono, valor y croma. Para este caso, tono se define como el nombre del color, es el que permite diferenciar una familia cromática de otra (rojo-amarillo), el valor se define como la luminosidad del color, esta característica permite diferenciar entre colores claros y oscuros, por último, la croma corresponde a la fuerza del color o la intensidad en un tono distinto. A partir de estos fundamentos, se han establecido escalas mediante instituciones de investigación en el área de la colorimetría como la CIE (International Commission on Illumination) como lo es la escala CIE $L^*a^*b^*$, CIE $L^*C^*h^*$ y CIE XYZ.

Escala CIELAB y CIELCh

El espacio de color $L^*a^*b^*$ conocido como CIELAB es uno de los espacios mayormente empleados en la evaluación de color de un objeto debido a su uniformidad. Este espacio de color correlaciona de forma consistente los valores numéricos de color con la percepción humana, dicho espacio fue modelado basándose en la teoría del color oponente la cual sugiere que dos colores no pueden ser rojo y verde o amarillo y azul al mismo tiempo.

De esta manera el espacio CIE $L^*a^*b^*$ (Figura 11) se compone de:

L^* = Luminosidad

a^* = Coordenadas Rojo/Verde (+a indica rojo, -a indica verde)

b^* = Coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul)

Para la medición y obtención de los valores para cada coordenada pueden emplearse aparatos como espectrofotómetro y colorímetros.

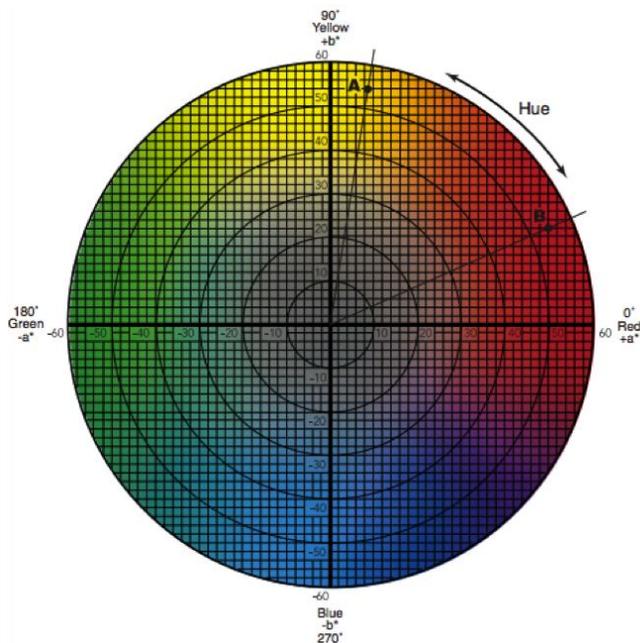


Figura 11. Diagrama de cromaticidad del espacio CIELAB

El espacio de color CIELCh es muy similar al CIELAB debido a que correlaciona el valor numérico con la percepción humana, sin embargo, la diferencia entre los dos espacios de color es que CIELCh emplea coordenadas de tipo cilíndricas en vez de las rectangulares de CIELAB, el espacio CIELCh se compone de:

L^* = Luminosidad

C^* = Color y

h^* = Matiz

de esta manera, L^* representa el valor de la luminosidad, C^* es el valor de croma o saturación y h^* es el ángulo de matiz (Figura 12). El valor de C^* se toma en referencia a la distancia de esta al eje de luminosidad (L^*) y comienza en 0 en el centro, para el caso del ángulo de matiz, este comienza en el eje +a y se expresa en grados. De la misma manera instrumentos como espectrofotómetro y colorímetro permiten obtener los valores para cada coordenada.

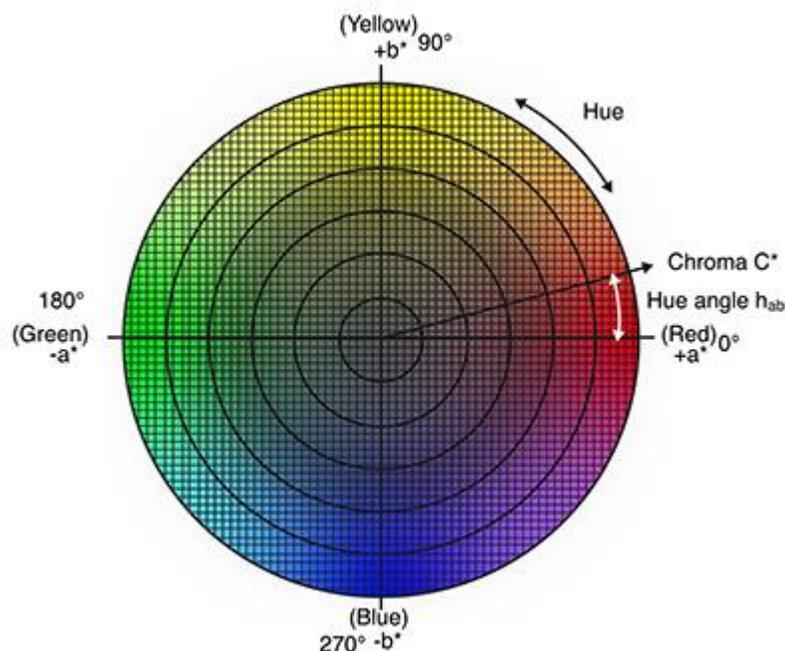


Figura 12. Diagrama de cromaticidad del espacio CIELCh

Avances y Resultados de Investigación en Sorgo para Consumo Humano

En la actualidad, la investigación agronómica en el cultivo de sorgo, ha generado áreas orientadas a resolver problemáticas propias del cultivo como lo es la generación de variedades e híbridos con tolerancia a plagas y enfermedades (Guden *et al.*, 2019; Bandara *et al.*, 2019; Triplett, 2020). Un área que se ha desarrollado en los últimos años ha sido la investigación orientada a la integración del cultivo a la dieta humana, realizando mejoramiento para obtención de variedades con buen comportamiento agronómico y estabilidad, complementando la investigación de campo con análisis en laboratorio que permiten obtener el perfil nutricional del grano (Dicko *et al.*, 2006; Montes-García *et al.*, 2012; Gallardo *et al.*, 2013; Dyner *et al.*, 2017).

A nivel mundial existen instituciones tanto de investigación de tipo gubernamental como instituciones educativas que han orientado sus esfuerzos a la búsqueda y generación de genotipos con potencial para consumo humano, obteniendo resultados positivos, como es el caso del CENTA en el Salvador, el cual ha

generado genotipos como CRV, Soberano, S-3 y Jocoro; la Universidad Central de Las Villas en Cuba con LES-132 R, LES-150 R y UDG-110, el INTSORMIL como programa de sorgo de la Universidad de Nebraska, el ICRISAT en la India y la Universidad de Texas (Texas A&M). Para el caso de México, instituciones como el INIFAP, han generado variedades como RB Paloma, Perla 101, Blanco 86 y Mazatlán 16, al igual que la UAAAN con las variedades VAN-18 y AN-40.

MATERIALES Y MÉTODOS

Etapa I. Evaluación en Campo

Material Genético

La semilla de los genotipos usados fue colectada de parcelas establecidas durante el ciclo agrícola PV-2018, en el Campo Experimental Buenavista, ubicado Buenavista, en el municipio de Saltillo, perteneciente a la región Sureste del estado de Coahuila, dentro de las coordenadas (25° 21´ 29´´ Latitud N, 101° 02´ 21´´ Longitud O). El rango de precipitación media anual es de 350-400 mm, con una temperatura media anual de 18.8 °C y presencia de suelos calcáreos.

Ubicación del Experimento

El experimento se estableció el 18 de mayo de 2019 en el Campo Experimental Buenavista, ubicado en la Sede de la UAAAN, en la ex-hacienda de Buenavista, a 7 km al sur de la ciudad de Saltillo. Se localiza entre las coordenadas geográficas 25° 22" de latitud norte y 101° 02" longitud oeste y a una altitud de 1742 msnm. Con una precipitación media anual de 350-400 mm, temperatura media anual de 18.8 °C y una predominancia de suelos con textura de migajón y migajón arcillosa, con bajos contenidos de materia orgánica y presencia de una capa de carbonato de calcio.

Preparación de las Acciones para Siembra

El experimento se estableció con 7 genotipos de sorgo para grano [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] (LES12, LES 13, LES-17, LES-35, LES,75, LES-93 y LES-102) y un testigo representado por un híbrido comercial. La semilla de los genotipos empleados se obtuvo directo de las panojas tal y como se cosecharon en campo, por lo que fue necesario trillar y limpiar la semilla. Posteriormente, se calculó el total de semilla requerida para cada parcela experimental y repetición, de acuerdo a la densidad de siembra estimada, la cual fue de 18 plantas por metro lineal con la finalidad de realizar raleo, dejando una densidad final de 16

plantas por metro. A las accesiones obtenidas para cada parcela y repetición, se le aplicó un tratamiento químico a base de:

- Tratamiento fungicida: Carboxin + Thiram a una dosis de 2 a 2.5 ml por kg de semilla.
- Tratamiento insecticida: Bifentrina + Imidacloprid a dosis de 7.5 a 10 ml por kg de semilla.
- Promotor de germinación: Giberelinas, auxinas, aminoácidos a dosis de 25 ml de producto para 50 ml de agua para un kg de semilla.

La semilla de cada genotipo y bloque se colocó en cajas de Petri y posteriormente tratada mediante la aplicación de una cantidad mínima de solución (de 2-3 ml). Una vez aplicado el tratamiento, se dejó en secado por 24 horas. Posteriormente, las semillas de cada caja de Petri se colocaron en sobres de papel, rotulados con el genotipo y bloque correspondiente de acuerdo al croquis de campo.

Manejo Agronómico

Previo al establecimiento del experimento, el terreno se barbechó, rastreó y surcó a 0.80 cm de distancia entre surcos. La siembra se realizó trazando en primera instancia las parcelas experimentales compuestas por un surco de 3.80 m y las calles entre bloques con 0.80 m. Se llevó a cabo la siembra de forma manual, distribuyendo las semillas uniformemente sobre la superficie del surco de siembra.

El aporte de riego se realizó mediante la instalación de un sistema de riego por goteo, con cintilla con goteros a 30 cm. Se aplicó un riego pre-emergente inmediatamente después de la siembra, y 4 riegos en las etapas 1-5 de acuerdo a la fenología del cultivo, descrita anteriormente. En etapas de mayor requerimiento del cultivo (E6 y E7), se aplicó riego rodado.

El control de malezas se realizó de forma preventiva durante la siembra, mediante la aplicación de un herbicida pre-emergente (Atrazina), y durante las etapas de desarrollo vegetativo (E2-E6) se empleó control manual de malezas.

El control de plagas se desarrolló mediante un esquema de manejo convencional, con el empleo de insecticidas de tipo organofosforado (Clorpirifos etil) y

piretroides (Permetrina y Cipermetrina), a dosis de 1-3 ml por litro de agua para el control de trips (*Frankliniella spp.*) y pulgón amarillo del sorgo (*Melanaphis sacchari*), manejándose como tratamiento preventivo y correctivo. Además, se empleó un insecticida de tipo espinosin (Spinoteram) para el control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), a razón de 1 ml por litro de agua, realizándose dos aplicaciones con cuatro días de diferencia entre cada aplicación para un control efectivo.

El control de enfermedades de tipo foliar (fúngicas), se realizó de forma preventiva mediante la aplicación de Clorotalonil en etapa de desarrollo vegetativo, y Propiconazol durante embuche hasta llenado de grano.

No existió fertilización de presembrado. Para solventar las necesidades del cultivo se aplicaron aspersiones foliares de fertilizante triple 20, ácidos húmicos y fúlvicos. En etapa E3 (30-40 DDE), se realizó el aporque y previo a este, se aplicó una fertilización al suelo, mediante una mezcla de 30 kg de fertilizante granulado triple 17 (NPK) y 20 kg de fosfato diamónico (DAP).

Las líneas experimentales de sorgo se cosecharon durante el mes de octubre de 2019, realizándose posterior a la cosecha el trillado, lavado y secado de los granos, para almacenarlos en bolsas plásticas bajo condiciones de refrigeración a 10 ° C

Variables Evaluadas

Las variables agronómicas evaluadas en esta etapa del experimento son:

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): Se midió la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, por medio del sensor NDVI portátil (GreenSeeker Handled CropSensor) y el software correspondiente, en etapa de desarrollo vegetativo.

Días a Floración (DF): Se tomó en cuenta el número de días transcurridos a partir del momento de siembra, hasta que la población de la parcela experimental se encontraba en antesis media (50%).

Altura de Planta (AP): Se midió en centímetros, desde la base de la misma hasta la punta de la panícula, esta variable se evaluó en la etapa de maduración fisiológica del grano, con ayuda de cinta métrica, realizando un muestreo de tres plantas elegidas al azar en competencia completa, el resultado se expresó en centímetros (cm).

Longitud de Exersión (LE): Se determinó la longitud del tallo comprendida entre la hoja bandera hasta la base de la panícula, de tres plantas elegidas al azar, en competencia completa por parcela, esta variable se determinó en etapa de madurez fisiológica y su resultado se expresa en centímetros (cm).

Longitud de Panícula (LP): Con el empleo de una cinta métrica, se midió la longitud comprendida entre la base de la panícula hasta el ápice de la misma, de tres plantas seleccionadas al azar, en competencia completa por parcela, en etapa de madurez fisiológica.

Longitud de Hoja (LH): Se realizó seleccionando una hoja de la parte intermedia de tres plantas con competencia completa, midiendo con cinta métrica desde la base hasta la punta, en etapa de madurez fisiológica.

Ancho de Hoja (AH): Se seleccionó una hoja de la parte intermedia de tres plantas con competencia completa, a estas hojas se les midió el ancho por la parte media longitudinal empleando cinta métrica, en etapa de madurez fisiológica. Se determinó en las hojas empleadas en la variable LH.

Diámetro de Tallo (DT): Con apoyo de un Vernier, se tomó la medida del diámetro del tallo en la parte media, de tres plantas con competencia completa, en etapa de madurez fisiológica.

Incidencia de Daño por Aves en Panícula (IDA): Se evaluó de forma visual y en términos porcentuales (0-100%) de acuerdo al total de daño ocasionado a la panícula por las aves.

Incidencia de Enfermedades Foliares (IEF): Se evaluó aplicando una escala de 1 a 5. Dónde: (1) es completamente sana; (2), de 1 a 10% de daño; (3), 11 a 25% de daño; (4), de 26 a 40% de daño y (5), más de 41% de daño. La toma de datos (IEF), se realizó de acuerdo a las recomendaciones sugeridas por House (1985).

Grados Brix (GB): Se tomaron tres muestras (Basal, Intermedia y Superior) en una planta representativa de la parcela, extrayendo el jugo del tallo de cada sección, y colocándolo en el refractómetro para determinar el contenido de azúcares en Grados Brix para las tres secciones de cada genotipo, con estos datos se obtuvo la media estadística y este valor se tomó como el contenido de azúcares en Grados Brix del genotipo evaluado, esta variable se determinó en etapa de anthesis media (floración).

Rendimiento de Grano en Gramos por Planta (RGGP): En etapa de cosecha, se seleccionaron 5 panículas representativas de la parcela, las cuales se les aplicó un proceso de trillado de forma individual. La suma de los pesos individuales de las panojas, se promedió, obteniendo así el promedio del peso del grano en gramos por planta.

Peso de Mil Semillas (PMS): Se aplicó el procedimiento establecido por las reglas de la ISTA (2019). Tomando 8 repeticiones de 100 semillas, calculando el coeficiente de variación el cual debió ser menor a 4%, para promediar las ocho repeticiones y multiplicar por 10. Esta variable se evaluó en etapa de postcosecha.

Análisis estadístico

El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar, con tres bloques, cada bloque consistió de siete genotipos experimentales y un testigo híbrido comercial, teniendo un total de 24 parcelas experimentales. Se determinaron las variables DF, NDVI, AP, LE, LP, DT, IDA, EF, GB, AH, LH, RGGP y PMS, y se analizaron usando el paquete estadístico SAS versión 9.1 (2003), bajo el siguiente modelo estadístico lineal:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + G_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Valor observado de i-ésimo genotipo en la j-ésimo bloque.

μ = Media general.

β_i = Efecto la j-ésimo bloque.

G_j = Efecto de i-ésimo genotipo.

ε_{ij} = Efecto del error experimental del j-ésimo bloque del i-ésimo genotipo.

$i = 1, 2, 3 \dots b$

$j = 1, 2, 3 \dots g$

También se realizó la comparación de medias usando la Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), para contrastar la respuesta de las variables evaluadas con relación al testigo empleado. Se determinaron los coeficientes de correlación lineal de Pearson para todas las variables evaluadas, usando el paquete estadístico SAS versión 9.1(2004).

Etapa II. Laboratorio: Propiedades cromáticas y calidad nutracéutica de granos y harinas (contenido de fenoles y flavonoides totales).

Las pruebas de laboratorio se condujeron en el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica de Semillas y de Granos del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS). Se empleó una mezcla compuesta por genotipo, la cual se generó mediante la integración de grano producto de la autopolinización de las panículas de los tres bloques establecidos en campo de la Etapa I (Campo).

Material genético

Consistió de muestras de grano de las siete líneas experimentales de sorgo con diferentes pigmentaciones (LES-35, LES-75, LES-17, LES-12, LES-13, LES-102 y LES -93), provenientes de la Etapa I, de la siembra en un suelo con predominante textura de migajón- migajón arcillosa, bajo contenido de materia orgánica y con presencia de una capa de carbonato de calcio. Las líneas experimentales de sorgo posterior a la cosecha (octubre 2019), se mantuvieron almacenadas en bolsas plásticas, a una temperatura de 10 ° C. Durante el mes de febrero de 2020, se extrajeron las muestras del almacén, después de lo cual, los granos (endospermo y salvado) se molieron y tamizaron para obtener harina con un tamaño de partícula $\leq 0,5$ mm (malla 35).

Variables evaluadas

Color del grano

En una caja de Petri (4.73 cm x 1.5 cm) se colocaron 100 g de grano de cada línea experimental, enseguida el color se determinó con un lector de color 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 Liberación de Alimentos (CIE 15, 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° = rojo, 90° = amarillo, 180° = verde, 270° = 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 de cada línea experimental fueron molidos en un molino eléctrico, después se tamizaron para obtener partículas con tamaño <0.5 mm (usando el tamaño de malla estándar 35). Posteriormente, la harina obtenida de

los granos de cada línea experimental fue colocada en una caja de Petri (4.73 cm x 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.* (2019). 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 5750xg (25 °C, 5 min) y el sobrenadante fue recuperado y almacenado a -20 °C hasta su análisis.

Fenoles totales

Los ensayos de compuestos fenólicos y de capacidad antioxidante se realizaron en un espectrofotómetro Thermo Spectronic BioMate3 (Rochester, NY, USA). La determinación de fenoles totales, flavonoides totales y taninos condensados se realizaron 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 Na₂CO₃ 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 (mgGAE/100 g), calculado a partir de la curva de calibración de ácido gálico de 0 a 200 mg L⁻¹.

Flavonoides totales

La determinación del contenido de flavonoides se basó en la reacción del complejo AlCl₃-NaNO₂-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 NaNO₂ al 5%, 0.15 mL de AlCl₃ al 10% y 1 mL de NaOH 1 M, a intervalos de 5 minutos 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 (mgCE/100 g), calculado a partir de la curva de calibración de catequina de 0 a 200 mg L⁻¹.

Taninos condensados

El contenido de taninos condensados se determinó mediante la reacción del complejo vanillin-H₂SO₄. Del extracto, se tomaron 0.25 mL y se agregaron 0.65 mL de vainillina al 1%; después, 0.65 mL de H₂SO₄ al 25% (ambos se disolvieron 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 (mgCE/100 g), calculados a partir de la curva de calibración para catequina de 0 a 200 mg L⁻¹.

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 N (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 5750xg (4 °C, 15 min) y finalmente, se midieron 3.5 mL de muestra a 535 nm. El contenido de antocianinas se informó como miligramos de equivalentes de cianidina-3-glucósido (C₃GE) por cien gramos de muestra (mgC₃GE/100 g) como sigue: $C = (A/\epsilon) * (V/1000) * MW * (1/\text{peso de muestra}) * 106$, donde: C = concentración en mgC₃GE/L, A = absorbancia de muestra, ϵ = absorción molar (mgC₃GE = 26,695 1/cm 1/mol), V = volumen de muestra, MW = peso molecular de C₃G (449.2 g/mol).

Capacidad antioxidante

Los métodos de capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) se realizaron de acuerdo con Rodríguez-Salinas *et al.* (2019). La capacidad antioxidante de DPPH (2,2-difenyl-1-1-picrylhydrazyl) se evaluó utilizando una solución de trabajo 60 µM en

metanol al 80%, con una absorbancia ajustada a 0.7 a 517 nm. El ensayo se llevó a cabo mezclando 50 μ 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 (ácido 3-ethyl-benzothiazoline-6-sulfónico) se llevó a cabo utilizando una solución de trabajo obtenida mezclando 1 mL de ABTS al 7.4 mM y 1 mL de $K_2S_2O_8$ 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 μ 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 los ensayos 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 (μ molTE/100 g), en base a la curva de calibración con Trolox en concentraciones de 0 a 500 μ mol/L. La 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

Se realizó un análisis de varianza (ANVA), y las medias de las variables evaluadas 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

Etapa I. Evaluación de Variables Agronómicas

De acuerdo al análisis de varianza (Cuadro 6) las variables DF, NDVI, AP, LE, LP, DT, IDA, EF, GB, AH, LH, RGGP y PMS, no mostraron diferencias significativas entre bloques, lo que permite detectar pequeñas diferencias presentes entre genotipos, siendo estos resultados similares a los obtenidos por Flores *et al.* (2013), influenciado en gran medida por el manejo homogéneo aplicado al lote experimental. Sin embargo, en los resultados presentados por López (2020) observaron diferencias altamente significativas entre bloques, como resultado de gradientes de humedad y calidad del suelo. Para este experimento, la variación disminuyó por la aplicación de riego homogéneo mediante sistema de riego por goteo y nutrición granulada, complementada con aplicaciones foliares, lo que redujo el efecto del suelo en el desarrollo del cultivo. Se observó que, en los genotipos evaluados, las variables DF, NDVI, AP, LE, LP, IDA, AH, LH obtuvieron diferencias altamente significativas (Cuadro 6), lo que permitió identificar su potencial genético diferenciado, expresándose en el fenotipo, indicando la existencia de un alto grado de variabilidad entre ellos, coincidiendo con los resultados obtenidos por Tesfamichael *et al.* (2015). Estos resultados también se asemejan a los reportados por Flores *et al.* (2012), Flores *et al.* (2013), Gutiérrez *et al.* (2013) y López (2020).

Para la variable DT se observó diferencia significativa ($P \leq 0.05$), la cual podría ser generada por el factor genético, al igual que para la variable Enfermedades Foliares (EF), donde se encontró diferencia significativa entre genotipos, lo cual está determinado por la susceptibilidad o tolerancia del genotipo a las enfermedades presentadas durante el desarrollo del cultivo, y por el manejo preventivo homogéneo aplicado al lote experimental.

Cuadro 6. Cuadrados medios del ANVA para variables agronómicas de ocho genotipos experimentales de sorgo establecidas bajo un manejo convencional.

| F.V. | G.L. | DF (Días) | NDVI (%) | AP (cm) | LE (cm) | LP (cm) | DT (mm) | IDA (%) | EF (Coef) | GB (%) | AH (cm) | LH (cm) | RGPP (g) | PMS (g) |
|------------------|------|--------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------|------------|------------|-------------|--------------|
| Bloques | 2 | 13.54 NS | 0.000 NS | 104.34 NS | 4.24 NS | 0.93 NS | 4.60 NS | 10.72 NS | 0.29 NS | 7.37 NS | 0.37 NS | 70.79 NS | 47.486 NS | 33.073 NS |
| Genotipos | 7 | 85.97 ** | 0.003 ** | 2442.16 ** | 94.79 ** | 13.28 ** | 9.22 * | 2612.55 ** | 0.64 * | 4.70 NS | 3.71 ** | 130.55 ** | 1185.982 * | 42.658 * |
| Error | 14 | 19.06 | 0.00 | 100.56 | 3.04 | 1.68 | 2.75 | 84.32 | 0.19 | 5.81 | 0.45 | 25.73 | 306.539 | 11.849 |
| Total | 23 | | | | | | | | | | | | | |
| C.V. | | 4.99 | 2.0E7 | 7.24 | 16.51 | 4.78 | 9.69 | 58.59 | 31.28 | 32.14 | 8.47 | 7.01 | 21.466 | 12.417 |

ns= No significativo; *= Significativo ($P \leq 0.05$); **= Altamente significativo ($P \leq 0.01$); FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; DF= Días a floración; NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada; AP= Altura de planta; LE= Longitud de exersión; LP= Longitud de panícula; DT= Diámetro de tallo; IDA= Incidencia de daño por aves; EF= Enfermedades foliares; GB= Grados Brix; AH= Ancho de hoja; LH= Longitud de hoja; RGPP= Rendimiento de grano en gramos por planta; PMS= Peso de mil semillas.

Cuadro 7. Comparación de medias de las variables evaluadas en ocho genotipos experimentales de sorgo.

| | DF (Días) | NDVI (%) | AP (cm) | LE (cm) | LP (cm) | DT (mm) | IDA (%) | EF (Coef) | GB (%) | AH (cm) | LH (cm) | RGPP (g) | PMS (g) |
|---------------|--------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------|------------|------------|-------------|------------|
| LES-12 | 98.66 a | 0.76 d | 192.66 a | 14.44 b | 27.00 ab | 17.94 ab | 0.00 b | 1.00 b | 6.13 a | 9.95 a | 75.33 ab | 112.89 a | 32.00 ab |
| LES-13 | 89.33 ab | 0.78 c | 144.44 b | 7.77 cde | 28.44 ab | 18.21 ab | 0.07 b | 1.00 b | 7.02 a | 7.21 bc | 74.22 ab | 91.19 a | 29.13 ab |
| LES-17 | 86.66 ab | 0.80 b | 146.67 b | 6.44 e | 29.11 a | 19.31 a | 0.67 b | 1.00 b | 7.16 a | 7.55 bc | 80.22 a | 108.31 a | 29.37 ab |
| LES-35 | 89.00 ab | 0.80 b | 119.55 bc | 7.22 de | 28.33 ab | 17.85 ab | 15.30 b | 1.33 ab | 9.40 a | 7.81 bc | 74.55 ab | 64.62 a | 23.57 ab |
| LES-75 | 86.66 ab | 0.74 e | 94.89 c | 3.11 e | 23.11 c | 17.76 ab | 5.53 b | 1.66 ab | 8.11 a | 8.92 ab | 63.44 b | 72.78 a | 22.87 b |
| LES-93 | 80.66 b | 0.76 d | 142.89 b | 20.99 a | 26.77 abc | 15.72 ab | 17.20 b | 1.66 ab | 6.90 a | 6.22 c | 64.11 b | 63.60 a | 24.80 ab |
| LES-102 | 84.33 b | 0.80 b | 146.00 b | 12.33 bc | 25.33 bc | 13.76 b | 0.00 b | 2.33 a | 6.16 a | 7.88 bc | 67.22 ab | 68.60 a | 27.13 ab |
| Testigo | 84.00 b | 0.85 a | 120.44 b | 12.22 bcd | 29.22 a | 16.29 ab | 86.60 a | 1.33 ab | 9.11 a | 7.76 bc | 79.55 a | 70.48 a | 32.90 a |
| Media | 87.41 | 0.786 | 138.44 | 10.56 | 27.16 | 17.10 | 15.67 | 1.41 | 7.50 | 7.91 | 72.33 | 81.56 | 27.72 |
| Tukey(P≤0.05) | | 45E-10 | 28.89 | 5.03 | 3.74 | 4.78 | 26.46 | 1.28 | 4.99 | 1.93 | 14.62 | 50.44 | 9.92 |

LES=Línea Experimental de Sorgo; DF= Días a floración; NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada; AP= Altura de planta; LE= Longitud de exersión; LP= Longitud de panícula; DT= Diámetro de tallo; IDA= Incidencia de daño por aves; EF= Enfermedades foliares; GB= Grados Brix; AH= Ancho de hoja; LH= Longitud de hoja; RGPP= Rendimiento de grano en gramos por planta; PMS= Peso de mil semillas.

Las variables RGGP y PMS presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre genotipos, indicando variación en la conformación genética de las líneas en estudio.

Además de identificar las diferencias estadísticas mostradas por el ANVA entre genotipos, se requiere saber en qué magnitud se presentan, por tal razón, se realizó la prueba de comparación de medias (Tukey ≤ 0.05) (Cuadro 7).

Para la variable DF (Cuadro 7), se observa que LES-93 es el genotipo más precoz, superando por 3.3 días al testigo, por el contrario, LES-12 es el genotipo más tardío, presentando un retraso en la floración de 14.6 días respecto al testigo. Esta variable está determinada por las condiciones ambientales de temperatura y fotoperiodo, este último factor, afecta dependiendo de la fotosensibilidad del genotipo, regulada a nivel genético por la proteína CONSTANS, tal y como lo demuestran Yang *et al.* (2014).

Para el caso del NDVI, el testigo presentó los valores más altos con 0.85, es decir, el desarrollo foliar fue mayor para este genotipo, mientras que para LES-12 el valor fue el más bajo con 0.76 (Cuadro 7), esto puede deberse al grado de desarrollo que presentaban los genotipos al momento de ser evaluados. La variable DF es un indicador de cómo cada genotipo avanza en las etapas fenológicas a través del tiempo, tomando como referencia al testigo con el valor más alto, es posible observar que es también el más precoz. Por otro lado, LES-12 con valores más bajos de NDVI, es además el genotipo de hábito más tardío, asimismo debe considerarse que la toma de datos para esta variable (NDVI) se realizó en un solo día para todos los genotipos. Esta manera de evaluar el NDVI, genera sesgos debido a la heterogeneidad en el desarrollo fenológico del cultivo, sobre todo en experimentos donde se emplea una diversidad genética amplia. Por tal motivo Aktas y Burak (2017), sugieren que la evaluación del NDVI se realice basado en el desarrollo fenológico específico de cada genotipo y no en un referente cronológico homogéneo como normalmente se realiza.

Con relación a la variable AP (Cuadro 7), únicamente 2 genotipos (LES-35 y LES-75) presentaron valores menores al testigo (120.4 cm) con 119.5 y 94.8 cm, todos los demás mostraron mayor altura de planta. Esta variable es determinante en la

evaluación de la homocigosis del genotipo, empleándose como una de las variables que permiten identificar el nivel de homogeneidad del mismo. De acuerdo con Magalhães *et al.* (2003), la altura de planta está definida, además del tallo, por otros componentes de la fisiología de la planta, como la longitud de exersión y la longitud de panícula. Sin embargo, el número de entrenudos está determinado por los genes de la maduración del cultivo y por la sensibilidad al fotoperiodo y la temperatura que se presente durante el desarrollo del cultivo, por otra parte, la longitud de entrenudos está determinada por un conjunto de cuatro pares de genes (*dw1*, *dw2*, *dw3* y *dw4*), los cuales actúan de forma independiente y aditiva, sin afectar el periodo de crecimiento y el número de hojas. A su vez, en algunos genotipos estos genes actúan de forma recesiva, generando enanismo (60-80 cm). Los cultivos para la producción de grano como en este caso son considerados “Enanos-3”, presentando comportamiento recesivo en tres loci y comportamiento aditivo en uno, por esta razón LES-12 podría considerarse como “Enanos-2”, debido a que es muy posible que presente comportamiento recesivo en dos loci y comportamiento aditivo en dos, generando alturas próximas a los dos metros.

Para la variable LE (Cuadro 7), tres genotipos (LES-102, LES-12 y LES-93) superaron al testigo, y los cuatro restantes estuvieron por debajo de este, esta variable se considera dentro de los objetivos de mejoramiento del cultivo, debido a que valores altos de esta variable en conjunto con genotipos de porte bajo, permiten la mecanización de la cosecha de forma efectiva (Poehlman, 2005).

De acuerdo a los datos obtenidos para la variable LP (Cuadro 7), los genotipos superiores fueron el testigo (29.22) y LES-17 (29.11), los demás presentaron valores menores. De acuerdo a lo expuesto por Magalhães *et al.* (2003), tanto la variable LE como LP, guardan una correlación positiva con la variable AP, esto puede observarse en el genotipo LES-75, que presentó los valores más bajos para las tres variables, mientras que LES-12 presentó valores altos para las mismas variables evaluadas.

Respecto a la variable DT (Cuadro 7), LES-17 presentó el valor más alto con 19.31 mm, superando al testigo, el cual obtuvo 16.2 mm, por otra parte, LES-102

presentó el DT más bajo, con 13.7 mm. Esta variable pudiera ser definida por el factor genético, sin embargo, Gómez (1992) reportó que el diámetro de tallo puede ser modificado por las densidades de siembra establecidas así como por el método de siembra empleado, para este caso se descarta al método de siembra, puesto que se aplicó en forma manual en todas las parcelas experimentales, sin embargo las densidades de siembra, si difirieron tanto entre genotipos como entre bloques, esto debido a las diferencias entre los genotipos evaluados. De esta manera, pudiera atribuirse esta diferencia a las variaciones en las densidades de siembra obtenidas como resultado de la germinación variable de los genotipos.

En cuanto a IDA (Cuadro 7), la mayoría de los genotipos presentaron valores bajos de daño, sin embargo, el testigo presentó mayor incidencia, razón por la cual, para la producción de grano para consumo humano, estaría descartado regionalmente. De acuerdo a lo reportado por Saucedo *et al.* (2017), los ataques de aves al cultivo de sorgo se dan en mayor medida en genotipos con colores claros, disminuyendo esta incidencia en sorgos con granos de colores rojizos a oscuros. Compton (1990) menciona que los sorgos con contenidos altos de taninos condensados en etapa de madurez fisiológica, generalmente de pigmentación rojiza a oscura, presentan resistencia al ataque de aves. Saucedo *et al.* (2017) mencionan que el ataque de aves varía de acuerdo al grado de maduración del grano de sorgo, de acuerdo al sabor astringente de los cianógenos precursores de los taninos, además de que el ataque dependerá de la región, de las especies de aves y de la disponibilidad de otros alimentos para estas aves.

En cuanto a EF (Cuadro 7), los genotipos presentan valores cercanos a uno, es decir, valores bajos en la incidencia de estas enfermedades, con lo que se comprueban los resultados obtenidos en el ANVA. Estos resultados, probablemente sean influenciados por el manejo agronómico relacionado al control de plagas y enfermedades aplicado de forma homogénea para todas las parcelas experimentales.

Para la variable GB (Cuadro 7), se encontró que LES-12 obtuvo los valores más bajos con 6.1%, mientras que LES-35 presentó el valor más alto con 9.40%, siendo el único genotipo que superó al Testigo, que presentó 9.11%. Ratnavathi *et al.* (2011) mencionan que los niveles promedio de contenido de azúcares en el tallo de sorgos dulces, normalmente están en un rango de 16 a 18%; por su parte Montes-García *et al.* (2010) y Rajvanshi *et al.* (1993), mencionan que los azúcares presentes en el tallo del sorgo pueden contener niveles de 12 a 22% de sacarosa. Por lo que los valores reportados para los genotipos evaluados en este experimento se consideran valores bajos con relación a estos parámetros. La causa del contenido de GB de acuerdo con Murray *et al.* (2009), se debe a que esta característica está sujeta a un control poligénico. Por su parte Makanda *et al.* (2009), atribuyen las altas concentraciones de azúcares en el tallo de sorgo a condiciones de estrés, ya sea por altas o bajas temperaturas, siendo las óptimas de 25 a 30°C, y temperaturas con efecto adverso, aquellas ubicadas de 30-45 °C. En este sentido Bernal *et al.* (2014), mencionan que además del efecto genético, la interacción del genotipo con las condiciones ambientales incide en las concentraciones de azúcares en el tallo. Por su parte Alhajturki *et al.* (2012) indican que las altas concentraciones de azúcares son empleados como un ajuste osmótico, lo que le permite a la planta mantener la absorción de agua, para generar mayores tasas de fotosíntesis y desarrollo del cultivo. Con estos fundamentos, pudiera inferirse que los bajos niveles de GB, en los genotipos evaluados en la presente investigación se debieron a que no existieron condicionantes de estrés hídrico, debido a la aplicación de riegos durante las diversas etapas fenológicas del cultivo.

En el caso de las variables LH y AH, se observa como estas inciden en la variable RGGP, ya que para el genotipo LES-12, donde se presentaron los valores de 9.95 cm para AH y 75.33 cm para LH, se obtuvo el segundo mejor rendimiento, mientras que para LES-17 donde AH presentó un valor de 7.55 cm y LH de 80.22 cm, se obtuvo el mejor rendimiento, esto es, los genotipos que presentaron al menos una de las dos variables (AH o LH) con los valores medios más altos, el rendimiento fue alto, esto se fundamenta en el incremento del área fotosintética

de la planta, lo que permite obtener energía y nutrientes en mayor medida, caso contrario fue LES-102, el cual presentó valores bajos en ambas variables, y por lo tanto, el menor RGGP después del testigo.

Respecto a las variables RGGP (Cuadro 7), los genotipos LES-12 y LES-17 presentaron los valores más altos con 112.89 g y 108.31 g, mientras que el valor más bajo lo obtuvo el testigo con 70.48 g, debido principalmente al daño por aves el cual fue de 86.6%. Es así como la prueba de medias generó agrupamientos disímiles, comprobándose la existencia de diferencias entre genotipos, debidas a la composición genética de cada uno de ellos.

Para PMS (Cuadro 7), el genotipo testigo presentó el valor más alto con 32.90 g, mientras que el genotipo LES-75 obtuvo el valor más bajo, con 22.87 g. Se observa que mientras mayor sea el PMS, mayor es el RGPP, sin embargo, esta afirmación no se cumple para el caso del testigo, aclarando que el bajo rendimiento se debió al ataque de aves que este sufrió antes de la cosecha. Esta situación pudiera ser además una de las causas del alto peso de la semilla, debido a que el ataque de aves comenzó desde la etapa de formación, lo cual generó que la translocación de nutrientes se llevara a cabo para una menor cantidad de granos en formación, generando una mejor acumulación de reservas, además, considerando que el peso de la semilla es componente del rendimiento, dicho comportamiento pudiera estar relacionado a la eficiencia fotosintética de la planta, para elaborar nutrientes y fuentes de energía, que coadyuvan en la acumulación de reservas del grano, permitiendo a estas obtener un mayor peso. Los genotipos seleccionados presentaron un comportamiento homogéneo a nivel experimental, lo que pudo comprobarse mediante el análisis de varianza y los resultados de las pruebas de medias, dichos comportamientos serán cada vez más homogéneos en función del mejoramiento que se aplique en cada ciclo agrícola. Basado en el rendimiento como principal criterio empleado en la selección y discriminación de genotipos, puede afirmarse que, para esta etapa de campo, los genotipos que presentaron un mejor comportamiento en campo son LES-12, LES-13, LES-17 y LES-75, los cuales obtuvieron un RGPP mayor. Sin embargo, los siete genotipos experimentales fueron evaluados a nivel

laboratorio con la finalidad de no descartar materiales que pudieran tener caracteres de calidad nutracéutica aprovechables.

Posterior al análisis de varianza y a la prueba de medias, se determinó el coeficiente de correlación lineal de Pearson, con la finalidad de detectar la existencia de alguna interacción entre las variables evaluadas, estableciendo con ello la causalidad del comportamiento de dichas variables, por lo que, a continuación, se presentan las correlaciones (Cuadro 8).

Cuadro 8. Coeficientes de correlación lineal de Pearson para las variables evaluadas de siete genotipos experimentales de sorgo.

| | DF (Días) | NDVI (%) | AP (cm) | LE (cm) | LP (cm) | DT (mm) | IDA (%) | EF (Coef) | GB (%) | AH (cm) | LH (cm) | RGPP (g) | PMS (g) |
|------|------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| DF | --- | -0.268 ns | 0.586 ns | -0.189 ns | 0.067 ns | 0.503 ns | -0.354 ns | -0.560 ns | -0.231 ns | 0.790 * | 0.357 ns | 0.711 * | 0.358 ns |
| NDVI | --- | --- | -0.110 ns | 0.010 ns | 0.680 ns | -0.192 ns | 0.712 * | -0.037 ns | 0.441 ns | -0.256 ns | 0.675 ns | -0.159 ns | 0.518 ns |
| AP | --- | --- | --- | 0.514 ns | 0.277 ns | 0.031 ns | ns | ns | -0.737 * | 0.252 ns | 0.288 ns | 0.680 ns | 0.575 ns |
| LE | --- | --- | --- | --- | 0.123 ns | ns | 0.196 ns | 0.207 ns | ns | ns | -0.193 ns | -0.156 ns | 0.222 ns |
| LP | --- | --- | --- | --- | --- | 0.338 ns | 0.387 ns | -0.636 ns | 0.256 ns | ns | 0.857 ** | 0.283 ns | 0.576 ns |
| DT | --- | --- | --- | --- | --- | --- | ns | -0.874 ** | 0.222 ns | 0.243 ns | 0.498 ns | 0.634 ns | 0.092 ns |
| IDA | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.033 ns | 0.625 ns | ns | 0.348 ns | -0.379 ns | 0.397 ns |
| EF | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.151 ns | -0.163 ns | -0.705 ns | -0.690 ns | -0.460 ns |
| GB | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | ns | -0.113 ns | -0.690 ns | -0.213 ns |
| AH | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | ns | 0.252 ns | -0.480 ns | ns |
| LH | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.111 ns | 0.470 ns | 0.231 ns |
| RGPP | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.542 ns | 0.729 * |
| PMS | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.586 ns |

ns= No significativo al 5% de acuerdo al análisis de correlación de Pearson; *= Significativo al 5% de acuerdo al análisis de correlación de Pearson; **= Altamente significativo al 5% de acuerdo al análisis de correlación de Pearson; DF= Días a floración; NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada; AP= Altura de planta; LE= Longitud de exersión; LP: Longitud de panícula; DT= Diámetro de tallo; IDA= Incidencia de daño por aves; EF= Enfermedades foliares; GB= Grados Brix; AH= Ancho de hoja; LH= Longitud de hoja; RGPP= Rendimiento de Grano en gramos por planta; PMS= Peso de mil semillas.

En este tipo de análisis, se considera la existencia de una correlación entre variables en función del valor del coeficiente, de tal manera que la existencia de una correlación positiva fuerte presenta un coeficiente con una tendencia a aproximarse a 1.00, por el contrario, cuando este se aproxima a -1.00, se considera la existencia de una correlación negativa fuerte, mientras que cuando los valores del coeficiente se aproximan a cero, la existencia de correlación es nula, por lo que la hipótesis nula podría ser aceptada.

Los coeficientes de correlación (Cuadro 8) permitieron observar una relación positiva significativa entre las variables NDVI e IDA ($r = 0.712 *$), esta relación si bien no pudiera ser comprendida de manera directa, obedece a los tiempos en que el análisis de NDVI fue aplicado. En apartados anteriores se ha mencionado que la toma de datos del NDVI se realiza siempre en una etapa fenológica determinada, y no en diferentes etapas de desarrollo del cultivo, por lo que, al momento de realizarse la toma de datos en campo para dicha variable, los genotipos con mayor avance en su desarrollo fenológico presentaron mayor desarrollo vegetativo y, en consecuencia, alcanzaron más rápidamente la etapa de llenado y maduración del grano, generando alimento disponible para las especies de aves presentes en la región. Esto es observable si se considera como ejemplo al genotipo Testigo, el cual presentó los valores más altos para NDVI, pero además fue el genotipo con menos días a la floración, lo que le permitió alcanzar la etapa de llenado y madurez del grano en menor tiempo respecto a los genotipos experimentales, volviéndose una fuente de alimento disponible y vulnerable ante las aves de la región.

Las variables DF y AH muestran una correlación positiva ($r = 0.719 *$), indicando que mientras más tarda la planta en alcanzar la floración (menos precoz), el ancho de la hoja incrementa en mayor medida. Esta variable pudiera confundirse con el NDVI, sin embargo, la diferencia es que el NDVI se basa en la captación espectral y tonalidad de la misma, a partir de una imagen, a diferencia del AH que se mide a través de una escala métrica, mostrando el comportamiento individual de la característica muestreada y no una aproximación del conjunto.

Con relación a las variables AP y GB, estas muestran una relación negativa ($r = -0.737^*$), es decir, que mientras mayor sea la altura de la planta, el contenido de sólidos solubles medidos en Grados Brix disminuye. Estos resultados difieren de lo obtenido por Almodares y Hoseini (2016), quienes obtuvieron correlaciones fuertemente positivas para dichas variables, evaluando sorgos dulces, cuya altura de planta fue similar a la de los genotipos evaluados en este experimento. Del mismo modo la variable LP y LH mantienen una relación positiva significativa ($r = 0.857^{**}$), lo cual está en función de la eficiencia fotosintética de la planta, esta eficiencia dependerá de la calidad y cantidad del área foliar determinada por la longitud y ancho de hoja, permitiendo generar mayor tejido del tallo y en consecuencia una mayor longitud de la panícula.

Por otra parte, se observó una relación negativa significativa entre las variables DT y EF ($r = 0.874^{**}$), lo que significa que los genotipos que presentaron Diámetros de Tallo con valores más bajos, fueron más susceptibles de ser atacados por alguna enfermedad foliar. Esta relación está establecida principalmente por la calidad del área foliar de la planta, la cual incide directamente en la generación de tejido estructural, mediando la disponibilidad de energía asimilable, la cual se genera principalmente durante el proceso fotosintético que tiene lugar en las hojas.

Para la variable PMS, se observó una relación positiva significativa con LH ($r = 0.729^*$), la cual pudiera estar relacionadas con la eficiencia fotosintética y la translocación de los nutrientes hacia las diferentes funciones de la planta, por un lado puede suponerse que una mayor generación de tejidos y área foliar en mayor medida, incrementa la translocación de nutrientes y genera mayor gasto de nutrientes en esta actividad, disminuyendo la cantidad de nutrientes disponibles para las funciones reproductivas.

Etapa 2. Laboratorio: Propiedades cromáticas y calidad nutracéutica de granos y harinas (contenido de fenoles y flavonoides totales).

En el Cuadro 9 se presentan los cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en laboratorio. Los resultados indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para todas las variables en estudio, lo anterior indica que las líneas experimentales presentaron contrastes en los parámetros cromáticos del grano y en el contenido de polifenoles.

Color del grano

Las características de color del grano de las líneas experimentales de sorgo mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre ellas (Cuadro 10). 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 ± 1.55 y 40.27 ± 1.45 , respectivamente), mientras que los valores más altos se presentaron en LES-75 y LES-35 (48.62 ± 1.71 y 64.31 ± 0.87 , respectivamente). Estos resultados fueron similares a los reportados por Sedghi *et al.* (2012), quienes encontraron valores de L^* en un rango de 36 a 70 en genotipos de sorgo pigmentados. Con relación a las propiedades de color, la luminosidad (L^*) puede disminuir debido al contenido de antocianinas en el grano (Yang *et al.*, 2008).

Las líneas experimentales LES-17 y LES-12 mostraron los valores más altos en C^* (18.57 ± 0.43 y 18.49 ± 0.67 , respectivamente) que indican una mayor saturación del color, los valores de C^* más bajos (12.72 ± 0.73 y 14.01 ± 0.64) 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 concuerdan con los reportados 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 nuestros, ya que se encuentran en un rango de 64.68 a 83.61, por lo que nuestros

genotipos son más oscuros que los de ellos. 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.

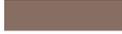
Cuadro 9. Cuadrados medios del ANVA para las propiedades cromáticas y el contenido de fenoles y flavonoides totales de líneas experimentales de sorgo

| FV | GL | L* | C* | H | Fenoles totales (mgGAE/100 g) | Flavonoides totales (mgCE/100 g) |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|----------|--|---|
| Línea experimental | 6 | 211.98** | 16.28** | 492.90** | 567196.29** | 496467.47** |
| Error | 14 | 1.87 | 0.69 | 9.20 | 792.74 | 754.74 |
| CV (%) | | 2.93 | 5.01 | 5.54 | 4.61 | 5.62 |

*, ** = Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV = Fuentes de variación; GL = Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación; L*= Parámetros de luminosidad; C*= Parámetros de saturación; h= Parámetros ángulo hue; mgGAE= Miligramos equivalentes de ácido gálico; mgCE= Miligramos equivalentes de catequina.

Las lecturas del ángulo hue (h) de las líneas experimentales de sorgo variaron de 40.19 a 80.12 (Cuadro 10), 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 a los valores obtenidos en L^* , C^* y h , se clasificaron los genotipos de sorgo en dos grupos de colores: 1) Naranja oscuro desaturado, que incluye a LES-35, LES-75, LES-17, LES-13 y LES-102; 2) y Rojo oscuro desaturado, que incluye a LES-12 y LES-93.

Cuadro 10. Propiedades cromáticas de los granos de líneas experimentales de sorgo.

| Línea experimental | Parámetro de color | | | Vista en color |
|--------------------|--------------------|---------------|----------------|---|
| | L^* | C^* | h | |
| LES-12 | 40.27 ± 1.45ed | 18.49 ± 0.67a | 44.31 ± 3.25cd |  |
| LES-13 | 44.43 ± 1.57c | 17.89 ± 0.86a | 54.76 ± 2.25b |  |
| LES-17 | 45.61 ± 1.38bc | 18.57 ± 0.43a | 54.66 ± 2.12b |  |
| LES-35 | 64.31 ± 0.87a | 16.88 ± 0.41a | 80.12 ± 0.64a |  |
| LES-75 | 48.62 ± 1.71b | 12.72 ± 0.73b | 57.75 ± 4.61b |  |
| LES-93 | 39.26 ± 1.55e | 14.01 ± 0.64b | 40.19 ± 4.28d |  |
| LES-102 | 44.01 ± 0.69cd | 17.86 ± 1.53a | 51.23 ± 2.04bc |  |

Diferentes letras en columnas indican diferencia estadística ($p < 0.05$). Los valores se informan como media ± desviación estándar ($n = 3$); L^* = Parámetros de luminosidad; C^* = Parámetros de saturación; h = Parámetros ángulo hue.

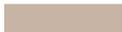
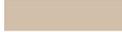
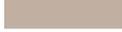
Color de la harina

Las características de color de las harinas mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en los parámetros L^* , C^* y h (Cuadro 11). Los valores más bajos para L^* fueron 70.84 ± 1.00 y 71.84 ± 0.29 que corresponden a LES-12 y LES-93, respectivamente, mientras que los valores más altos (78.22 ± 0.65 y 74.48 ± 0.64) se reportaron en LES-35 y LES-13, respectivamente. Estos resultados fueron más bajos que los reportados 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 presentaron un color más claro que el grano y, en consecuencia, una mayor luminosidad. 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 (Palavecino *et al.*, 2016).

Las lecturas de C^* para todas las muestras fueron bajas, con valores de 9.02 a 12.87 ubicados en la zona gris del círculo de matiz. Con respecto al ángulo hue (h) (Cuadro 11), 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).

Cuadro 11. Propiedades cromáticas de las harinas obtenidas de líneas experimentales de sorgo

| Línea experimental | Parámetro de color | | | Vista en color |
|--------------------|--------------------|----------------|---------------|---|
| | L^* | C^* | h | |
| LES-12 | 70.84 ± 1.00d | 11.05 ± 0.11bc | 64.54 ± 1.95b |  |
| LES-13 | 74.48 ± 0.64b | 11.31 ± 0.05b | 66.46 ± 1.86b |  |
| LES-17 | 73.75 ± 1.04bc | 11.47 ± 0.42b | 67.03 ± 0.13b |  |
| LES-35 | 78.22 ± 0.65a | 12.87 ± 0.29a | 78.22 ± 3.01a |  |
| LES-75 | 72.89 ± 0.50bcd | 10.32 ± 0.22cd | 68.23 ± 1.73b |  |
| LES-93 | 71.84 ± 0.29cd | 9.58 ± 0.14de | 68.56 ± 2.83b |  |
| LES-102 | 73.66 ± 0.91bc | 9.02 ± 0.56e | 67.11 ± 0.83b |  |

Diferentes letras en columnas indican diferencia estadística ($P \leq 0.05$). Los valores se informan como media ± desviación estándar ($n = 3$); L^* = Parámetros de luminosidad; C^* = Parámetros de saturación; h = Parámetros ángulo hue.

Fenoles totales y flavonoides totales

Los resultados indicaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en fenoles y flavonoides totales entre las muestras analizadas (Cuadro 12). La concentración de fenoles totales osciló entre 84.77 a 1203.96 mgGAE/100 g. El nivel más alto de fenoles totales se obtuvo en LES-13 (1203.96 ± 55.61 mgGAE/100 g), seguido de LES-17 (1041.41 ± 15.12 mgGAE/100 g), mientras que LES-75 y LES-35

presentaron los valores más bajos (84.77 ± 2.47 y 89.30 ± 4.06 mgGAE/100 g, respectivamente). Las líneas LES-102, LES-93 y LES-12, presentaron una cantidad moderada de fenoles (445.21 ± 37.24 , 652.19 ± 5.46 y 749.83 ± 28.06 mgGAE/100 g, respectivamente) en comparación con las otras líneas.

El contenido de fenoles totales de las líneas evaluadas es similar a los valores reportados por Shen *et al.* (2018), quienes obtuvieron una concentración de 174.40 a 1238.83 mg GAE/100 g en genotipos de sorgo de grano blanco, negro, y marrón. El color del grano es una de las razones que da como resultado las diferencias en el contenido de fenoles, sin embargo, la variación en el contenido de polifenoles de los granos de sorgo puede provenir de otras razones, como la nutrición de la planta y el ambiente de crecimiento (Hahn *et al.*, 1984).

El contenido de flavonoides totales presentó una tendencia similar al contenido de fenoles (Cuadro 12); LES-13 presentó el mayor contenido (1012.14 ± 37.23 mgCE/100 g), seguido de LES-17, LES-12 y LES-93 con valores relativamente altos (922.39 ± 26.42 , 617.33 ± 40.21 , 577.81 ± 27.46 mgCE/100 g, respectivamente), mientras que el menor contenido se obtuvo con LES-35 y LES-75 (11.70 ± 0.90 , 15.27 ± 1.55 , respectivamente). 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 y 5.25 mg CE/g. 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 cánceres de seno (Romagnolo y Selmin, 2012).

Cuadro 12. Contenido de fenoles totales y flavonoides totales en líneas experimentales de sorgo

| Línea experimental | Fenoles totales (mgGAE/100 g) | Flavonoides totales (mgCE/100 g) |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| LES-12 | 749.83 ± 28.06c | 617.33 ± 40.21c |
| LES-13 | 1203.96 ± 55.61a | 1012.14 ± 37.23a |
| LES-17 | 1041.41 ± 15.12b | 922.39 ± 26.42b |
| LES-35 | 89.30 ± 4.06f | 11.70 ± 0.90e |
| LES-75 | 84.77 ± 2.47f | 15.27 ± 1.55e |
| LES-93 | 652.19 ± 5.46d | 577.81 ± 27.46c |
| LES-102 | 445.21 ± 37.24e | 260.45 ± 28.70d |

Diferentes letras en columnas indican diferencia estadística ($P \leq 0.05$). Los valores se informan como media \pm desviación estándar ($n = 3$); mgGAE= Miligramos equivalentes de ácido gálico; mgCE= Miligramos equivalentes de catequina.

Taninos condensados, antocianinas totales y capacidad antioxidante (DPPH y ABTS)

En el Cuadro 13 se presentan los cuadrados medios del análisis de varianza para el estudio de compuestos de tipo flavonoide y capacidad antioxidante. Los resultados indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para el contenido de tipo flavonoide y la capacidad antioxidante por DPPH y ABTS en las líneas experimentales de sorgo.

En el Cuadro 14 se observa que todas las líneas experimentales con excepción de LES-75 y LES-75, presentaron contenidos significativos de taninos condensados (269.95 a 2831.61 mgCE/100 g), siendo LES-13 y LES-17 los de mayor contenido (2831.61 ± 21.17 y 2796.98 ± 23.81 mgCE/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 a 48.47 mg CE/g, a excepción de LES-75 y LES-35 que mostraron valores más bajos que los informados por estos autores. De acuerdo con Dykes y Rooney (2006), las líneas LES-13 y LES-17 se pueden clasificar como sorgos de alto nivel en taninos condensados.

Cuadro 13. Cuadrados medios del ANVA para el contenido de taninos condensados, antocianinas totales y capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) de líneas experimentales de sorgo

| FV | GL | Taninos condensados (mgCE/100 g) | Antocianinas totales (mgC₃GE/100 g) | DPPH (μmolTE/100 g) | ABTS (μmolTE/100 g) |
|--------------------|-----------|---|---|--------------------------------|--------------------------------|
| Línea experimental | 6 | 3791462.05** | 15.96** | 26734891.40** | 38206408.51** |
| Error | 14 | 4894.44 | 0.17 | 5951.82 | 22175.84 |
| CV (%) | | 5.32 | 6.42 | 2.85 | 4.16 |

*, ** = Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV = Fuentes de variación; GL = Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación; mgCE= Miligramos equivalentes de Catequina; mgC₃GE= Miligramos equivalentes de Cianidina-3-glucosido; μmolTE= Miligramos equivalentes de Trolox; DPPH= 2,2-difenyl-1-picrylhydrazyl; ABTS= Ácido 3-ethyl-benzothiazoline-6-sulfónico.

El color del grano afectó significativamente ($P \leq 0.05$) los niveles de antocianinas (Cuadro 14). Los sorgos de grano Rojo oscuro desaturado que incluyen a LES-12 y LES-93, presentaron los niveles más altos de antocianinas (29.06 ± 0.06 y 28.25 ± 0.08 mgC₃GE/100, 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 a 22.72 mgC₃GE/100 g. Estudios previos, han reportado que los sorgos de grano rojo presentan altos niveles de antocianinas Equivalentes de Apigeninidina (APGE) (1461.4 ± 98.7 mgAPGE/kg), seguido por sorgos color marrón (937.3 ± 29.4 mgAPGE/kg), mientras que los de pericarpio amarillo presentan bajos niveles (574.8 ± 105.4 mgAPGE/kg), además, las antocianinas pueden ser indetectables en la mayoría de los sorgos de grano blanco (Su *et al.*, 2017).

En este estudio, se encontró una diversidad distinguible en el contenido de antocianinas entre los colores del grano de las líneas experimentales de sorgo, las líneas experimentales rojas 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.*, 2013), sin embargo, aunque la capacidad en la biosíntesis de antocianinas está determinada por el genotipo, la actividad en la biosíntesis de antocianinas puede estar realmente influenciada por muchos factores ambientales (Su *et al.*, 2017).

Cuadro 14. Contenido de taninos condensados y antocianinas totales en líneas experimentales de sorgo.

| Línea experimental | Taninos condensados (mgCE/100 g) | Antocianinas totales (mgC ₃ GE/100 g) |
|--------------------|----------------------------------|--|
| LES-12 | 1665.31 ± 60.88b | 29.06 ± 0.06a |
| LES-13 | 2831.61 ± 21.17a | 24.68 ± 0.11bc |
| LES-17 | 2796.98 ± 23.81a | 22.72 ± 0.09c |
| LES-35 | 312.58 ± 12.07d | 14.87 ± 0.19d |
| LES-75 | 269.95 ± 9.44d | 12.91 ± 0.17d |
| LES-93 | 737.74 ± 15.60c | 28.25 ± 0.08ab |
| LES-102 | 584.50 ± 7.82c | 11.87 ± 0.13d |

Diferentes letras en columnas indican diferencia estadística ($P \leq 0.05$). Los valores se informan como media \pm desviación estándar ($n = 3$); mgCE= Miligramos equivalentes de Catequina; mgC₃GE= Miligramos equivalentes de Cianidina-3-glucósido.

Propiedades antioxidantes

Los ensayos de DPPH y ABTS fueron seleccionados para estimar 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 a 7579.17 $\mu\text{molTE}/100\text{ g}$, y 661.92 a 9435.91 $\mu\text{molTE}/100\text{ g}$ para los ensayos de DPPH y ABTS (Cuadro 15), respectivamente. 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. Wu *et al.* (2016) 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 a 25.49 mg TE/g y 0.98 a 38.08 mg TE/g en ABTS. Por su parte, Dykes *et al.* (2013) reportaron en híbridos y líneas de sorgo con grano pigmentado valores de 80 a 334 y mmolTE/g en ABTS, mientras que los valores de DPPH fueron de 32 a 177 mmolTE/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.

Cuadro 15. Capacidad antioxidante de DPPH y ABTS en líneas experimentales de sorgo

| Línea experimental | DPPH ($\mu\text{molTE}/100\text{ g}$) | IC50 (mg/mL) | ABTS ($\mu\text{molTE}/100\text{ g}$) | IC50 (mg/mL) |
|--------------------|---|--------------|---|--------------|
| LES-12 | 1691.52 \pm 58.97c | 23 | 2900.51 \pm 49.59c | 9 |
| LES-13 | 7579.17 \pm 40.02a | 5 | 9435.91 \pm 144.75a | 3 |
| LES-17 | 6426.54 \pm 110.78b | 6 | 7829.20 \pm 85.08b | 3 |
| LES-35 | 479.77 \pm 24.76f | 81 | 661.92 \pm 42.10f | 38 |
| LES-75 | 447.86 \pm 33.21f | 86 | 663.11 \pm 61.34f | 39 |
| LES-93 | 1269.41 \pm 139.97d | 31 | 2034.55 \pm 115.84d | 12 |
| LES-102 | 1053.33 \pm 54.76e | 37 | 1532.61 \pm 46.42e | 17 |

Diferentes letras en columnas indican diferencia estadística ($p < 0.05$). Los valores se informan como media \pm desviación estándar ($n = 3$); μmolTE = Miligramos equivalentes de Trolox; DPPH= 2,2-difenil-1-picrilhidrazil; ABTS= Ácido 3-ethyl-benzothiazoline-6-sulfónico; IC50= Índice de porcentaje de inhibición al 50%.

CONCLUSIONES

- Los genotipos experimentales evaluados, incluyendo el testigo, presentaron diferencias estadísticas significativas, indicando la diversidad genética presente dentro del experimento.
- Los genotipos LES-12, LES-13 y LES-17 presentaron un comportamiento agronómico homogéneo a nivel de campo en las variables consideradas para este experimento. De acuerdo al rendimiento obtenido, estos genotipos son los que presentan los valores más altos, siendo considerados los mejores del conjunto de líneas experimentales evaluadas en la presente investigación.
- Todos los genotipos considerados en la etapa de campo, a excepción del testigo, presentaron baja incidencia de daño por aves, lo que permite asegurar el potencial de rendimiento, al menos regionalmente.
- El análisis de calidad nutracéutica permitió observar cómo los genotipos LES-12, LES-13 y LES-17 son los que presentan mayor cantidad de fenoles y flavonoides, así como mayor capacidad antioxidante, producto de la presencia de altas cantidades de antocianinas en las harinas obtenidas.
- Los genotipos experimentales con colores más oscuros tanto en grano como en harina, presentaron los contenidos más altos en capacidad antioxidante y contenido de fenoles
- Los genotipos experimentales LES-35 y LES-75, cuya coloración presentó tonalidades más bajas en relación a la escala empleada, presentaron además bajos contenidos fenólicos, flavonoides, taninos condensados y capacidad antioxidante.
- Se cuenta con tres genotipos experimentales con características que permiten considerarlos dentro de un esquema de consumo humano, dicha afirmación deberá ser sustentada en etapas posteriores mediante la evaluación bromatológica y la elaboración de productos alimenticios a base de harina de sorgo, que reúna las exigencias del consumidor.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Aal, E. S., and Hucl, P. (1999). A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal chemistry*, 76(3), 350-354.
- Abdelhalim, T. S., Kamal, N. M. and Hassan, A. B. (2019). Nutritional potential of wild sorghum: Grain quality of Sudanese wild sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Food Science & Nutrition*, 7(4), 1529–1539. doi: 10.1002/fsn3.1002
- Aktas, A. F., and Burak, B. (2017). Phenology based NDVI time-series compensation for yield estimation analysis. 6th International Conference on Agro-Geoinformatics. doi: 10.1109/agro-geoinformatics.2017.8047038
- Alam, M. N., Bristi, N. J., and Rafiquzzaman, M. (2013). Review on in vivo and in vitro methods evaluation of antioxidant activity. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 21(2), 143-152.
- Alhajturki, D., Aljamali, M., Kanbar, A. and Azmah, F. (2012). Potential of some sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes under two water regimes for sugar and bio-ethanol production. *Sugar Tech*, 14(4), 376-382. doi: 10.1007/S12355-012-0181-x
- Allard, R. W. (1960). Principles of plant breeding. Davis, California: Wiley International Edition.
- Almodares, A., and Hoseini, S.S. (2016). Effect of sowing dates and nitrogen levels for ethanol production from sweet sorghum stalks and grains. *African Journal of Agricultural Research*, 11(4), p. 266-275. Doi: 10.5897/AJAR2015.9765.
- Alvarez, C. M. y Lock, O. (1992). Taninos. *Revista de Química*, 6(1), 47-63. Recuperado de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/4619>
- Arnao, M. B., Cano, A., y Acosta, M. (2001). The hydrophilic and lipophilic contribution to total antioxidant activity. *Food chemistry*, 73(2), 239-244.
- Aruna, C., y Audilakshmi, S. (2008). Breeding methods in sorghum. In: B. VS. Reddy, S. Ramesh, A. Kumar y C.L.L. Gowda. (Eds.), *Sorghum Improvement in the new millennium* (pp. 28-30). Patancheru, Andhra Pradesh, India: ICRISAT.
- Awika, J. M., Rooney, L. W., Wu, X., Prior, R. L., and 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.
- Awika, J. M., Rooney, L. W. y Waniska, R. D. (2005). Anthocyanins from black sorghum and their antioxidant properties. *Food Chemistry*, 90(1-2), 293–301. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.03.058

- Awika, J.M. y Rooney, L.W. (2004). Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry*, 65(9), 1199-1221. doi: 10.1016/j.phytochem.2004.04.001
- Badui D. S. (2006). *Química de los Alimentos*. México, México: Editorial Pearson Educación.
- Bandara, A. Y., Weerasooriya, D. K., Tesso, T. T., and Little, C. R. (2019). Stalk rot resistant sorghum genotypes are resilient to pathogen-mediated photosystem II quantum yield retardation. *Crop Protection*, 124(2019), 104852. doi: 10.1016/j.cropro.2019.104852
- Bandyopadhyay, R., Frederickson, D. E., McLaren, N. W., Odvody, G. N. and Ryley, M. J. (1998). Ergot: a new disease threat to sorghum in the Americas and Australia. *Plant Disease*, 82(4), 356-367. doi: 10.1094/PDIS.1998.82.4.356
- Bernal, J., Ligarreto, G. y Hernández, R. (2014). Efecto de la interacción genotipo por ambiente en la acumulación de azúcares en variedades de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) en el trópico bajo colombiano. *Agronomía Colombiana*, 32(3), 307-314. doi: 10.15446/agron.colomb.v32n3.45477
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., y Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25-30. doi: 10.1016/s0023-6438(95)80008-5
- Brouillard, R. (1982). Chemical Structure of Anthocyanins. In P. Markakis (Ed.), *Anthocyanins as Food Colors* (pp. 1-40). Michigan, USA: Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-472550-8.50005-6
- Carrasco, N., Zamora, M. A. y Melin, D. (2011). *Manual del Sorgo*. Buenos Aires, Argentina. Ediciones INTA.
- Chapke, R.R. and Tonapi, V.A. (2016). Best practices for sorghum cultivation and importance of value-addition. Training Manual 2016-17. Hyderabad, India: ICAR-Indian Institute of Millets Research.
- Choi, S. C., Kim, J. M., Lee, Y. G. and Kim, C. (2019). Antioxidant activity and contents of total phenolic compounds and anthocyanins according to grain colour in several varieties of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Cereal Research Communications*, 47(2), 228-238. doi: 10.1556/0806.47.2019.014
- Ciampitti, I. (2015). *Sorghum Growth and Development*. Department of Agronomy. Kansas State University. Recuperado de <https://bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/MF3234.pdf>

- CIE. (2020). International Standards. Disponible en: <http://cie.co.at/publications/international-standards>
- CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo). (2004). Enfermedades del maíz: una guía para su identificación en el campo. (4ta. Ed.) Recuperado de <https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/812/94349.pdf>
- CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo). (2016). Manejo agroecológico del gusano cogollero: feromonas. Recuperado de <https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/18262/58528.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ColorHexa. Color Encyclopedia: Information and Conversion. Computer Software. 2020. Available online: <https://www.colorhexa.com/>.
- Commission Internationale De L'eclairage. Cie 15: Technical Report: Colorimetry, Commission Internationale De L'eclairage, 3rd ed.; CIE: Vienna, Austria, 2004. 37.
- Compton, L.P. (1990). Agronomía del Sorgo. India: ICRISAT
- Cruz, C. y Velázquez, L. (2006). Caracterización de Plagas en los Cultivos Agrícolas Recuperado de: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/4099/1/01.pdf>
- Cuate-Mozo, V. A., Aragón-García, A., Pérez-Torres, B. C., López-Olguín, J. F., Morón, M. A. y Rojas-Martínez, R. I. (2016). Manejo del complejo gallina ciega (*Coleoptera: melolonthidae*) asociado al cultivo de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) en Puebla, México. *Agrociencia*, 50(7), 889-900.
- David, S.K. (1977). Host-selection and speciation in some South Indian aphids. In T. N. Ananthakrishnan (Ed.), *Insects and Host-specificity* (pp. 19-21). Delhi, India: Macmillan.
- Diaz, G. y Hernández, M. (1999). The sorghum midge *Stenodiplosis sorghicola* Coq. (*Diptera: Cecidomyiidae*) in Guanajuato, México. *Agrociencia*, 33(2), 175-178.
- Dicko, M. H., Gruppen, H., Traore, A. S., Voragen, A. G. J. and van Berkel, W. J. H. (2006). Sorghum grain as human food in Africa: Relevance of content of starch and amylase activities. *African Journal of Biotechnology*, 5(5), 384-395.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2007). Ley federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFPCCS_110518.pdf

- Dykes, L., Rooney, L. W., Waniska, R. D., and Rooney, W. L. (2005). Phenolic compounds and antioxidant activity of sorghum grains of varying genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(17), 6813-6818.
- Dykes, L., and Rooney, L. W. (2006). Sorghum and millet phenols and antioxidants. *Journal of cereal science*, 44(3), 236-251.
- Dykes, L., Peterson, G. C., Rooney, W. L., and Rooney, L. W. (2011). Flavonoid composition of lemon-yellow sorghum genotypes. *Food Chemistry*, 128(1), 173-179.
- Dykes, L., Rooney, W.L. and Rooney, L.W. (2013). Evaluation of phenolics and antioxidant activity of black sorghum hybrids. *Journal of Cereal Science*, 58(2), 278-283. doi: 10.1016/j.jcs.2013.06.006
- Dyner, L., Ferreyra, V., Sánchez, E., Cagnasso, C., y Olivera, M. (2017). Composición centesimal y contenido de minerales de harinas de sorgo blanco utilizadas en productos de consumo general y en productos libres de gluten. *Diaeta (Buenos Aires)*, 35(160), 16-21. Recuperado de <http://www.scielo.org.ar/pdf/diaeta/v35n160/v35n160a03.pdf>
- Eckhoff, S.R., and Watson, S.A. in: BeMiller J. and Whistler R. (Eds.), *Starch. Chemistry and technology*, 3rd ed., Elsevier, New York, 2009, pp. 373–439.
- Edmunds, L.K. (1964). Combined relation of plant maturity, temperature, and soil moisture to charcoal stalk rot development in grain sorghum. *Phytopathology*, 54(14), 514- 517.
- Elkhalifa, A. E. O., Bernhardt, R., Cardone, G., Marti, A., Lametti, S., and Marengo, M. (2017). Physicochemical properties of sorghum flour are selectively modified by combined germination-fermentation. *Journal of Food Science and Technology*, 54(10), 3307–3313. doi:10.1007/s13197-017-2781-7
- FAO (Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura). (1995). *El sorgo y el mijo en la nutrición humana*. Roma, Italia: FAO: Alimentación y nutrición. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/t0818s/T0818S00.htm#Contents>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2017). *FAOSTAT. ProdStat database, yearly production (en línea)*. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura). (2017). *Ciclo Biológico del Gusano Cogollero del maíz (en América Latina)*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i7424s.pdf>

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2018). Manejo integrado del Gusano Cogollero. Una guía para las escuelas de campo de agricultores rurales de África. Recuperado de <http://www.fao.org/3/I8665EN/i8665en.pdf>
- FAS-USDA (Foreign Agricultural Service- United State Department of Agriculture). (2019). World Agricultural Production. Circular Series. Recuperado de <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usdaesmis/files/5q47rn72z/cf95js84f/2f75rq88n/production.pdf>
- FAS-USDA (Foreign Agricultural Service- United State Department of Agriculture). (2020). World Agricultural Production. Circular Series. Recuperado de <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usdamis/files/5q47rn72z/dz0117445/qv33sf19j/production.pdf>
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura). (2016). Panorama Agroalimentario. Sorgo 2016. Recuperado de <http://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=15541>
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura). (2019). Panorama Agroalimentario. Sorgo 2019. Recuperado de <http://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=15541>
- Flores-Naveda, A., Valdez-Lozano, C.G.S., Rooney, W.L., Olivares Sáenz, E., Zavala-García, F., Gutiérrez-Díez, A. y Vázquez-Badillo, M. E. (2012). Rendimiento de grano en líneas de sorgo cultivadas bajo riego y riego limitado en Texas. *Phyton* (Buenos Aires), 81(1), 113-121. Disponible en <http://www.revistaphyton.fundromuloraggio.org.ar/vol81/15-FLORES-NAVEDA.pdf>
- Flores-Naveda, A., Valdés-Lozano, C.G.S., Zavala-García, F., Olivares-Sáenz, E., Gutiérrez-Díez, A. y Vázquez-Badillo, M. E. (2013). Comportamiento agronómico de líneas para la producción de semilla de sorgo. *Agronomía Mesoamericana*, 24 (1), 111-118. doi: 10.15517/am.v24i1.9646
- Frederickson, D. E., Mantle, P. G. and De Milliano, W. A. J. (1991). *Claviceps africana* sp. nov., the distinctive ergot pathogen of sorghum in Africa. *Mycological Research*, 95(9), 1101-1107. doi: 10.1016/S0953-7562(09)80555-8
- Gallardo, I., Boffill, Y., Ozuna, Y., Gómez, O., Pérez, M., y Saucedo, O. (2013). Producción de bebidas usando sorgo malteado como materia prima para enfermos celiacos. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(1), p. 61-74.
- Gerik, T., Bean, B. and Vanderlip, R. (2003). Sorghum Growth and Development. Texas FARMER Collection. Texas A&M University. Recuperado de https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87184/pdf_1724.pdf?squence=1&isAllowed=y

- Gimeno C., E. (Junio de 2004). Compuestos Fenólicos: Un análisis de sus beneficios para la salud. *Revista OFFARM*. 23(6), p. 80-86. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-pdf-13063508>
- Gómez, I. (1992). Comportamiento de genotipos contrastantes de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), bajo dos métodos de siembra y cuatro densidades de población y viabilidad económica de la siembra al voleo (Tesis de Maestría). UANL, Marín, Nuevo León, México.
- Guajardo-Flores, S. (2008). Evaluation of anticancer potential of sorghums with different genetic characteristics and levels of phenolic compounds (Tesis de Doctorado). Texas A&M University, College Station, Texas, EUA.
- Guden, B., Yol, E., Ikten, C., Erdurmus, C., and Uzun, B. (2019). Molecular and morphological evidence for resistance to sugarcane aphid (*Melanaphis sacchari*) in sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *3 Biotech*, 9(6), 1-7. doi:10.1007/s13205-019-1783-8
- Guija-Poma, E., Inocente-Camones, M.A., Ponce-Pardo, J., y Zarzosa-Norabuena, E. (2015) Evaluación de la técnica 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH) para determinar la capacidad antioxidante. *Horizonte Medico* (Lima), 15(1), 57-60.
- Gutiérrez-Palacios, N., Chow-Wong, Z., Bastianelli, D., Bonnal, L., Obando-Solís, R. y Trouche, G. (2013). Productividad y calidad nutricional de genotipos de sorgo para doble propósito. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 119-131. doi: 10.15517/am.v24i1.9789
- Hahn, D.H., Faubion, J.M., and Rooney, L.W. (1983). Sorghum phenolic acids, their high-performance liquid chromatography separation and their relation to fungal resistance. *Cereal Chemistry*, 60(4), 255-259. Recuperado de https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1983/Documents/chem60_255.pdf
- Hahn, D.H.; Rooney, L.W.; and Earp, C.F. (1984). Tannins and phenols of sorghum. *Cereal Foods World*, 29, 776–779.
- Hallman, G. J., Teetes, G. L., and Johnson, J. W. (1984). Relationship of the sorghum midge (*Diptera: Cecidomyiidae*) density to damage to resistant and susceptible sorghum hybrids. *Journal of Economic Entomology*, 77(11), 83-87. Doi: 10.1093/jee/77.1.83
- Hamid, S. (1987). Fecundity potential of graminaceous aphids in Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, 19(2), 103-107. Recuperado de <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19881115966>
- Hariprasanna, K. and Patil, J. V. (2015). Sorghum: Origin, Classification, Biology and Improvement. En R. Madhusudhana, P. Rajendrakumar y J.V. Patil (Eds.)

- Sorghum Molecular Breeding (pp. 23-46). Hyderabad, Telangana, India: Springer. doi: 10.1007/978-81-322-2422-8
- Hariprasanna, K., and Rakshit, S. (2016). Economic Importance of Sorghum. In S. Rakshit y Y. H. Wang (Eds.) *The Sorghum Genome*. (pp. 1-25). India: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-47789-3
- Hernández, R.F. (1971). Algunas observaciones sobre biología, ecología y control de la mosquita del sorgo (*Contarinia sorghicola* Coq.) en el valle de Culiacán, Sin. *Agricultura Técnica en México*, 3(3), 101-114.
- Hernández-Martínez, M., Cárdenas-Soriano, E., Mendoza-Onofre, L. E., Osada-Kawasoe, S., Ramírez-Vallejo, P. y Zavala-García, F. (2001). Patogénesis de *Claviceps africana* en ovarios de sorgo. *Agrociencia*, 35(5), 535-542. Recuperado de <https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2001/sep-oct/art-7.pdf>
- House, L.R. (1985). *A guide to sorghum breeding*. Patancheru. Andhra Pradesh, India: ICRISAT.
- Huang, D., Ou, B., and Prior, R. L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(6), 1841-1856.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2012). *Bioquímica y Genética de las Antocianinas del Grano de Maíz*. México, D.F.: INIFAP. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/313427218_Bioquimica_y_Genetica_de_las_Antocianinas_del_Grano_de_Maiz_2012_INIFAP_MEXICO/link/589a2c64aca2721f0db122b4/download
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2014). *La mosca de la panoja *Contarinia sorghicola* y su manejo en la planicie huasteca*. Recuperado de <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/1006.pdf>
- INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). (2016). *Trips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande), *Frankliniella australis**. Recuperado de <http://www.inia.cl/sanidadvegetal/2016/11/08/trips-frankliniella-occidentalis-pergande-frankliniella-australis/>
- INTA (Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria). (2010). *Enfermedades foliares reemergentes en el cultivo de maíz: Royas (*Puccinia sorghi* y *Puccinia polysora*), tizón foliar (*Exserohilum turcicum*) y mancha ocular (*Kabatiella zae*)*. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-act-tecnica-n2_16_enfermedades-foliares-reemergentes-.pdf

- INTA (Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria). (2017). Granos Básicos. Manual del protagonista. Recuperado de https://www.jica.go.jp/project/nicaragua/007/materials/ku57pq0000224spz-att/Granos_Basicos.pdf
- Jiménez, N.C. (1996). Manejo integrado para el control de la mosca del ovario del sorgo. En ICA (Ed). Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades en Maíz y Sorgo (pp. 27-37). Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano Agropecuario.
- Kenga, R., Tenkouano, A., Gupta, S. C., and Alabi, S. O. (2006). Genetic and phenotypic association between yield components in hybrid sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) populations. *Euphytica*, 150(3), 319-326.
- Khan, I., Yousif, A., Johnson, S. K., and 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(1), 578-586.
- Khoddami, A., Truong, H. H., Liu, S. Y., Roberts, T. H. and Selle, P. H. (2015). Concentrations of specific phenolic compounds in six red sorghums influence nutrient utilization in broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, 210, 190-199. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2015.09.029
- Kumar, A., Reddy, B., Sharma, H., Rao, P., Ramaiah and Reddy, P. (2011). Recent Advances in Sorghum Genetic Enhancement Research at ICRISAT. *American Journal of Plant Sciences*, 2(4), 589-600. doi: 10.4236/ajps.2011.24070
- Kumar, A. A. (2016). Botany, Taxonomy and Breeding. En S. Rakshit, y Y. H. Wang. (Eds.). *The Sorghum Genome* (pp. 27-45). India: Springer doi:10.1007/978-3-319-47789-3
- Kuskoski, E. M., Asuero, A. G., García-Parilla, M. C., Troncoso, A. M., y Fett, R. (2004). Actividad antioxidante de pigmentos antocianicos. *Food Science and Technology*, 24(4), 691-693. doi: 10.1590/S0101-20612004000400036
- Londoño, J. (2012). Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad. L. F. Garcés. (Ed.), *Desarrollo y Transversalidad* (pp. 129-162). Itagüí, Colombia: Corporación Universitaria Lasallista.
- Lopez-Contreras, J. J., Zavala-Garcia, F., Urias-Orona, V., Martinez-Avila, G. C. G., Rojas, R., and Guillermo, N. M. (2015). Chromatic, phenolic and antioxidant properties of *Sorghum bicolor* genotypes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 43(2), 366-370.
- López L., M.T. (Abril del 2002). Flavonoides. *Revista OFFARM*, 21(4), 108-114 Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-pdf-13028951>

- López, I. (2020). Producción de granos y semillas de líneas experimentales de sorgo con potencial para consumo humano (Tesis de Maestría en Tecnología De Granos y Semillas). UAAAN, Saltillo, Coahuila, México.
- López, M. y Fernández, M. (1999). Biology of *Melanaphis sacchari* (Z) in sugar cane. II- life cycle, survival curve and populations parameters. *Revista de Protección Vegetal*, 14(3), 155-159. Recuperado de <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-de-proteccion-vegetal/15>
- Magalhaes, P. C., Duraes, F. O., y Rodrigues, J. A. S. (2003). Fisiologia da planta de sorgo. *Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil: Embrapa-2000.*
- Makanda, I., Tongoona, P. y Derera, J. (2009). Combining ability and heterosis of sorghum germplasm for stem sugar traits under off-season conditions in tropical lowland environments. *Field Crops Research*, 114(2), 272–279. doi: 10.1016/j.fcr.2009.08.009
- Mihail, J. D. and Taylor, S. J. (1995). Interpreting variability among isolates of *Macrophomina phaseolina* in pathogenicity, pycnidium production, and chlorate utilization. *Canadian Journal of Botany*, 73(10), 1596-1603. doi: 10.1139/b95-172
- Miller, F. R. (1982). Genetic and environmental response characteristics of sorghum. In ICRISAT (Ed.), *Sorghum in the Eighties* (pp. 393-402). Patancheru, Andhra Pradesh, India: ICRISAT.
- Miller, N. J., Rice-Evans, C., Davies, M. J., Gopinathan, V. and Milner, A. (1993). A Novel Method for Measuring Antioxidant Capacity and its Application to Monitoring the Antioxidant Status in Premature Neonates. *Clinical Science*, 84(4), 407–412. doi:10.1042/cs0840407
- Mishra, K., Ojha, H., and Chaudhury, N. K. (2012). Estimation of antiradical properties of antioxidants using DPPH assay: A critical review and results. *Food Chemistry*, 130(4), 1036-1043.
- Montes-García, N. y Díaz-Franco, A. (2006). Fitopatología. En L.A. Rodríguez (Ed). *Campo Experimental Río Bravo: 50 Años de Investigación Agropecuaria en el Norte de Tamaulipas, Historia, Logros y Retos* (pp. 192–213). Tamaulipas, México: INIFAP-CIRNE
- Montes-García, N., Salinas, J.R., González J. A., Loredó P. R. y Díaz, G. (2010). Guía Técnica de producción de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) en Tamaulipas. Tamaulipas, México: INIFAP-CER Rio Bravo. Recuperado de <https://www.compucampo.com/tecnicos/guiatecnica-sorgodulce-tams.pdf>
- Montes-García, N., Williams-Alanís, H., Moreno-Gallegos, T., Cisneros-López, M. E., Pecina-Quintero, V. (2012). 'RB-Paloma', variedad de sorgo blanco para

- producción de grano y forraje. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(2), 185-187. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v35n2/v35n2a11.pdf>
- Moreno, T., Melgoza-Villagómez, C. M., Cuevas, V., Hernández-Espinal, L. A. (2017). Evaluación de la susceptibilidad a *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid en diferentes variedades e híbridos comerciales de sorgo en Sinaloa, México. *Nova Scientia*, 9(18), 186-199. doi: 10.21640/ns.v9i18.732
- Munsell A.H. (1905). *A color notation*. Boston: Ellis
- Murray, S. C., Rooney, W. L., Hamblin, M. T., Mitchell, S. E. and Kresovich, S. (2009). Sweet Sorghum Genetic Diversity and Association Mapping for Brix and Height. *The Plant Genome Journal*, 2(1), 48-62. doi: 10.3835/plantgenome2008.10.0011
- Nava, C. A., Rosales, R., Jiménez, R., Carrete, F. Ó., Domínguez, P. A. y Murillo, M. (2017). Rendimiento y valor nutricional de tres variedades de sorgo dulce cultivadas en cuatro ambientes de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(2), 147-155. doi: 10.22319/rmcp.v8i2.4426
- Odvody, G. N. and Dunkle, L. D. (1979). Charcoal stalk rot of sorghum: Effect of environment in host-parasite relations. *Phytopathology*, 69(3), 250-254.
- Ortega, A. (1987). *Insectos nocivos del maíz: una guía para su identificación en el campo*. México, D.F.: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Recuperado de <https://repository.cimmyt.org/handle/10883/732>
- Rodríguez-Palomera, M., Cambero-Campos, J., Luna-Esquivel, G., Estrada-Virgen, O., De Dios, N. y Cambero, C. (2016). Coccinélidos depredadores del pulgón amarillo del sorgo *Melanaphis sacchari* (Zehntner) (*Hemiptera: Aphididae*) en Nayarit, México. *Entomología Mexicana*, 3(2016), 360-364.
- Palavecino, P. M., Penci, M. C., Calderón-Domínguez, G., and Ribotta, P. D. (2016). Chemical composition and physical properties of sorghum flour prepared from different sorghum hybrids grown in Argentina. *Starch-Stärke*, 68(11-12), 1055-1064.
- Pecket, R. C. and Small, C. J. (1980). Occurrence, Location and Development of Anthocyanoplasts. *Phytochemistry*, 19(12), 2571- 2576. doi: 10.1016/S0031-9422(00)83921-7
- Pisoschi, A. M., and Negulescu, G. P. (2011). Methods for total antioxidant activity determination: a review. *Anal Biochem*, 1(1), 106.
- Poehlman, J. M. (2005). *Mejoramiento genético de las cosechas*. D.F., México: Editorial Limusa.

- Priyadarshan, P.M. (2019). Plant Breeding: Classical to Modern. doi:10.1007/978-981-13-7095-3
- Ratnavathi, C. V., Chakravarthy, S. K., Komala, V. V., Chavan, U. D. and Patil, J. V. (2011). Sweet Sorghum as Feedstock for Biofuel Production: A Review. Sugar Tech, 13(4), 399-407. doi: 10.1007/s12355-011-0112-2
- Rajvanshi, A. K., De, T. K., Jorapur, R. M. and Nimbkar, N. (1993). Jaggery and syrup from sweet sorghum. Publication No. NARI-GUR (1993), Phaltan, India: Nimbkar Agricultural Research Institute (NARI). Recuperado de <https://nariphaltan.org/SSbrochure1993.pdf>
- Rao, S., Elangovan, M., Umakanth, A. and Nadoor, S. (2008). Characterizing phenology and growth stages of sorghum hybrids. En V. Reddy, A. Ramesh, A. Kumar y C. Gowda. (Eds.). Sorghum Improvement in the New Millennium (pp. 16-22). Patencheru, Andhra Pradesh, India: ICRISAT Doi: 10.13140/2.1.4841.8246
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. and Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biology and Medicine, 26(9-10), 1231–1237. doi:10.1016/s0891-5849(98)00315-3
- Rensburg, N. J. V. (1973). Notes on the occurrence and biology of the sorghum aphid in South Africa. Journal of the Entomological Society of Southern Africa, 36(92), 293-298.
- Rodriguez, O.E., Andrade, W.A., y Diaz, F.E. (2015) Actividad antioxidante de extractos de hojas de *Bocconia frutescens* L. (Papaveraceae). Journal of Technology. 14(2) p. 21-36.
- Rodríguez-Salinas, P. A., Zavala-García, F., Urías-Orona, V., Muy-Rangel, D., Heredia, J. B., and Niño-Medina, G. (2019). 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(1), 95-112.
- Romagnolo, D. F., and Selmin, O. I. (2012). Flavonoids and cancer prevention: a review of the evidence. Journal of nutrition in gerontology and geriatrics, 31(3), 206-238.
- SAS Institute. (2004). SAS/STAT ® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA.
- Saucedo, O. M., Fernández, L. E., Quiñones, R., Rodríguez, G. y Moya, A. (2017). Las aves granívoras y el cultivo del sorgo en la provincia de Villa Clara, Cuba. Centro Agrícola, 44(2), 36-43.
- Sedghi, M., Golian, A., Soleimani-Roodi, P., Ahmadi, A., and 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(1), 57-62.
- SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria). (2014). Pulgón Amarillo (*Melanaphis sacchari* (Zehntner)). Ficha Técnica No. 43. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/159533/FICHA_T_CNICA_PAS.pdf
- SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria). (2019). Insectos benéficos contra pulgón amarillo. Recuperado de <https://www.gob.mx/senasica/articulos/insectos-beneficos-contra-pulgon-amarillo?idiom=es>
- Serna-Saldívar, S. (2010). Cereal Grains: Properties, Processing and Nutritional Attributes., doi: 10.1201/9781439882092
- Serna-Saldivar, S. O., and Espinosa-Ramírez, J. (2019). Grain Structure and Grain Chemical Composition. En J.R.N. Taylor y K.G. Duodu (Eds.). *Sorghum and Millets: Chemistry, Technology and Nutritional Attributes* (pp. 85-129). South Africa: Elsevier Inc. doi: 10.1016/b978-0-12-811527-5.00005-8
- Serna-Saldivar, S.O., and Rooney, L.W. (1995). Structure and chemistry of sorghum and millets. In D.V. Dendy (Ed.). *Sorghum and Millets Chemistry Technology* (pp. 69-124). St. Paul, MN: AACC.
- Shen, S., Huang, R., Li, C., Wu, W., Chen, H., Shi, J., ... and Ye, X. (2018). Phenolic compositions and antioxidant activities differ significantly among sorghum grains with different applications. *Molecules*, 23(5), 1203.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2014). Anuarios de producción agrícola 2012. Recuperado de <http://siap.sagarpa.gob.mx>.
- SIAP-SADER (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2018). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta SIACON (Base de datos). Producción nacional de sorgo, año 2018. Resumen por estados, ciclo agrícola, riego y temporal. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>
- SIAP-SADER (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2020). Avance de siembras y Cosechas. Resumen nacional por cultivo. Recuperado de http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do
- SNICS (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas). (2018). Regla para la calificación de semillas. Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Recuperado de

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/433923/Regla_Tecnica_Sorgo.pdf

- Songa, W. and Hillocks, R. J. (1996). Charcoal rot in common bean with special reference to Kenya. *International Journal of Pest Management*, 42(4), 213-219. doi: 10.1080/09670879609371998
- Su, X., Rhodes, D. H., Xu, J., Chen, X., Davis, H., Wang, D., ... and Wang, W. (2017). Phenotypic diversity of anthocyanins in sorghum accessions with various pericarp pigments. *Journal of Nutrition*, 10, 2155-9600.
- Taley, Y. M., Deori, B.P. and Thakare, K. R. (1975). Bionomics of *Contarinia sorghicola* Coquillet. *Indian Journal of Entomology*, 33(2), 202-208.
- Teetes, G.L., Manthe, C.S., Peterson, G.C., Leuschner, K. and Pendleton, B.B. (1995). Sorghum resistant to the sugarcane aphid, *Melanaphis sacchari* (Homoptera: Aphididae), in Botswana and Zimbabwe. *Insect Science and its Applications*, 16(1), 63-71. doi: 10.1017/S1742758400018336
- Tesfamichael, A., Githiri, S. M., Kasili, R., Araia, W. and Nyende, A. B. (2015). Genetic variation among sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) landraces from Eritrea under post-flowering drought stress conditions. *American Journal of Plant Science*, 6(9), 1410–1424. doi: 10.4236/ajps.2015.69141
- Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Zevallos, L., and Byrne, D. H. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of food composition and analysis*, 19(6-7), 669-675.
- Triplett, E. L. (2020). Significance of photoperiod on the fitness of the sugarcane aphid and applicability of brix refractometry as a potential method to predict and detect resistance of sorghum (Master Thesis). West Texas A&M University. Canyon, Texas.
- Tsimidou, M. (1998). Polyphenols and quality of virgin olive oil in retrospect. *Italian Journal of Food Science*, 2(10), 99-116.
- Tuinstra, M. R., Teferra, T.T., Claflin, L.E., Henzell, R.G., Borrell, A., Seetharama, N., Ejeta, G. and Rosenow, D.T. (2003). Breeding for resistance to root and stalk rots in sorghum. In J.F. Leslie (Ed.) *Sorghum and Millet Diseases* (pp. 281-286). Iowa, USA: Iowa State Press. doi: 10.1002/9780470384923.ch48
- Vallejo, F.A. y Estrada, E. I. (2002). *Mejoramiento Genético de Plantas*. Cali, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Vietor, D.M., Miller, F.R. and Cralle, H.T. (1990). Nonstructural carbohydrates in axillary branches and main stem of senescent and no senescent sorghum types. *Crop Science*, 30(1), 97-100. doi: 10.2135/cropsci1990.0011183X003000010022x

- Villanueva-Tiburcio, J.E., Condeso, L., e Asquiere, E. (2010). Antocianinas, ácido ascórbico, polifenoles totales y actividad antioxidante, en la cascara de camu-camu (*Myrciaria dubia* (H.B.K) McVaugh). *Ciencia E Tecnología de Alimentos*, 30(1), p. 151-160.
- Villeda, D. A. (2014). Caracterización morfoagronómica de 15 accesiones de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) con bajo contenido de lignina (Tesis de Maestría). Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador.
- Voegtlin, D., Villalobos, W., Sánchez, M. V., Saborío R., G. y Rivera, C. (2003). Guía de los áfidos alados (*Homoptera*) de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 51(2), 001-214.
- Waniska, R.D., Poe, J.H. and Bandyopadhyay, R. (1989). Effects of growth conditions on grain molding and phenols in sorghum caryopsis. *Journal of Cereal Science*, 10(3), 217-225. doi: 10.1016/S0733-5210(89)80051-7
- Webster, J. A. (1990). Yellow Sugarcane Aphid (*Homoptera: Aphididae*): Detection and Mechanisms of Resistance Among Ethiopian Sorghum Lines. *Journal of Economic Entomology*, 83(3), 1053–1057. doi: 10.1093/jee/83.3.1053
- Williams-Alanís, H., Pecina-Quintero, V., Zavala-García, F., Martínez-Hernández, R., Rangel-Estrada, S. E. y Machuca-Orta, I. (2004). Reacción a *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. de híbridos comerciales y experimentales de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para grano. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 22(2), 216-222.
- Williams-Alanís, H., Pecina-Quintero, V., Montes-García, N., Palacios-Velarde, O., Arcos-Cavazos, G. y Vidal-Martínez, V. A. (2009). Reacción de variedades de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para grano a *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 27(2), 148-155.
- Wong, D. (1995). *Química de los Alimentos: mecanismos y teoría*. España: Editorial Acribia, S. A.
- Wu, G., Johnson, S. K., Bornman, J. F., Bennett, S., Singh, V. and Fang, Z. (2016). Effect of genotype and growth temperature on sorghum grain physical and characteristics, polyphenol content, and antioxidant activity. *Cereal Chemistry*, 93(4), 419-425. doi: 10.1094/CCHEM-01-16-0003-R
- Wu, G., Johnson, S. K., Bornman, J. F., Bennett, S. J., and Fang, Z. (2017). Changes in whole grain polyphenols and antioxidant activity of six sorghum genotypes under different irrigation treatments. *Food Chemistry*, 214, 199-207.

- Yang, Z., Han, Y., Gu, Z., Fan, G., and Chen, Z. (2008). Thermal degradation kinetics of aqueous anthocyanins and visual color of purple corn (*Zea mays* L.) cob. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(3), 341-347.
- Yang, Z., and Zhai, W. (2010). Identification and antioxidant activity of anthocyanins extracted from the seed and cob of purple corn (*Zea mays* L.). *Innovative food science & emerging technologies*, 11(1), 169-176.
- Yang, S., Weers, B. D., Morishige, D. T., y Mullet, J. E. (2014). CONSTANS is a photoperiod regulated activator of flowering in sorghum. *BMC Plant Biology*, 14(1), 148. doi: 10.1186/1471-2229-14-148
- Zeledón, H., Hernández, M., Ayala, J., Guzmán, R., Borja, C., Alvarado, M. y Calderon, V. (2007). *Guía Técnica del Sorgo (Sorghum bicolor (L.) Moench)*. La Libertad, El Salvador: CENTA.
- Zhang, G. X. and Zhong, T.S. (1983). *Economic insects' fauna of China Fasc. 36 (Homoptera – Aphids)*. Beijing, China: Science Press.