

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ESTIMACIÓN DE EFECTOS GENÉTICOS DE 10 GENOTIPOS DE AVENA Y
SUS COMBINACIONES HÍBRIDAS PARA EL DESARROLLO DE POBLACIÓN
BASE

Tesis

Que presenta RODIMIRO HERNÁNDEZ GARCÍA
como Requisito Parcial para Obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

ESTIMACIÓN DE EFECTOS GENÉTICOS DE 10 GENOTIPOS DE AVENA Y
SUS COMBINACIONES HÍBRIDAS PARA EL DESARROLLO DE POBLACIÓN
BASE

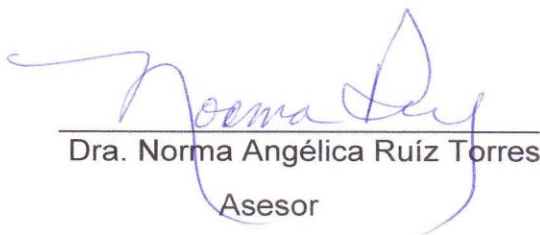
Tesis

Elaborado por RODIMIRO HERNÁNDEZ GARCÍA como requisito parcial para
obtener el grado de Maestro en Ciencias en Fitomejoramiento con la
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría




Dr. José Luis Velasco López

Director de Tesis



Dra. Norma Angélica Ruíz Torres

Asesor



Dr. Alejandro Javier Lozano Del Río

Asesor



Dr. Rosendo Hernández Martínez

Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Posgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Febrero 2025.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) y al Departamento de Fitomejoramiento, por brindarme acceso a sus instalaciones y servicios, fundamentales para mi formación profesional y el desarrollo de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el respaldo económico otorgado, el cual fue clave para la realización de mis estudios de maestría.

A mi asesor principal, el Dr. José Luis Velasco López, por permitirme colaborar en su proyecto, así como por su invaluable guía, apoyo constante y dedicación durante cada etapa de este trabajo.

A la Dra. Norma Angélica Ruíz Torres y al Dr. Alejandro Javier Lozano del Río, por su orientación académica, su tiempo y sus valiosas aportaciones, que enriquecieron este trabajo de investigación.

Al Dr. Rosendo Hernández Martínez, por su asesoría, disposición y por aceptar realizar mi estancia académica en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

A mis padres y hermanos quienes han sido mi pilar fundamental y mi mayor fuente de inspiración. Su amor incondicional, sacrificio y apoyo en cada paso de mi vida me han permitido alcanzar este logro.

A mis amigos, compañeros y profesores, cuya compañía, apoyo y orientación hicieron que este camino de dos años estuviera lleno de aprendizajes y experiencias significativas.

ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos.....	2
Hipótesis	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Descripción botánica de la avena.....	3
Producción de la avena.....	3
Principales usos de la avena.....	4
Importancia económica de la avena en México	5
Calidad nutricional de la avena	6
Diversidad genética de la avena.....	7
Mejoramiento genético en avena.....	9
Hibridación en plantas autógamas	10
Cruzamientos dialélicos	11
Heterosis.....	13
MATERIALES Y MÉTODOS	15
Estudio 1: Evaluación agronómica de los genotipos de avena.....	15
Ubicación del área experimental.....	15
Material genético	15
Preparación del terreno.....	16
Diseño experimental	16
Siembra.....	17
Dosificación de fertilización	17
Riegos	18
Control de malezas	19
Control de plagas y enfermedades.....	19

Variables evaluadas.....	19
Estudio 2: Plan de cruzas entre los genotipos de avena y evaluación de los híbridos F ₁	20
Ubicación del área experimental.....	20
Material genético	21
Diseño de siembra	21
Siembra.....	21
Fertilización	21
Riegos	21
Control de malezas	21
Control de plagas y enfermedades.....	21
Diseño de cruzamientos.....	22
Emasculaciones y cruzamientos.....	22
Evaluación de los híbridos F ₁ en el ciclo verano 2023.....	23
Ubicación del área experimental.....	23
Material genético	23
Preparación del terreno.....	23
Diseño experimental	23
Siembra.....	23
Fertilización	24
Riegos	24
Control de malezas	24
Control de plagas y enfermedades.....	24
Variables evaluadas.....	24
Heterosis.....	25
Heterobeltiosis	26
Análisis estadístico.....	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
Estudio 1. Evaluación agronómica de los genotipos de avena.....	27
Estudio 2. Evaluación de los híbridos F ₁	37
Heterosis.....	41
Heterobeltiosis	44
CONCLUSIONES.....	47

REFERENCIAS 48

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características agronómicas de los genotipos comerciales de avena evaluadas durante el ciclo O-I 2022-2023 en Saltillo, Coahuila y Galeana Nuevo León.	16
Cuadro 2. Características edáficas para cada localidad en base a los resultados análisis de suelo del laboratorio de Fertilab®.	18
Cuadro 3. Cuadrados medios del ANOVA para los rendimientos de forraje seco, grano y sus componentes en Buenavista, Saltillo, Coahuila. Ciclo O-I 2022-2023.	28
Cuadro 4. Medias para el rendimiento de forraje seco, rendimiento de grano y sus componentes en la localidad 1, Buenavista, Saltillo, Coahuila. Ciclo O-I 2022-2023.	30
Cuadro 5. Cuadrados medios del ANOVA para los rendimientos de forraje seco, grano y sus componentes en la localidad 2, Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo O-I 2022-2023.	31
Cuadro 6. Medias para los rendimientos de forraje seco, grano y sus componentes en la localidad 2, Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo O-I 2022-2023.	34
Cuadro 7. Medias para el rendimiento de forraje seco, grano y sus componentes en las dos localidades y con dos dosis de fertilización. Ciclo O-I 2022-2023.	35
Cuadro 8. Cuadrados medios del ANOVA para las características agronómicas evaluadas de los híbridos F_1 de avena en Navidad, Galeana, Nuevo León. Verano 2023.	38
Cuadro 9. Prueba de medias para las características agronómicas evaluadas de los híbridos F_1 de avena en Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo Verano 2023.	40
Cuadro 10. Valores de heterosis de los híbridos F_1 de avena evaluadas en Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo Verano 2023.	43
Cuadro 11. Valores de heterobeltiosis de los híbridos F_1 evaluadas en Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo Verano 2023.	45

RESUMEN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

ESTIMACIÓN DE EFECTOS GENÉTICOS DE 10 GENOTIPOS DE AVENA Y
SUS COMBINACIONES HÍBRIDAS PARA EL DESARROLLO DE POBLACIÓN
BASE

Tesis

Que presenta RODIMIRO HERNÁNDEZ GARCÍA
como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

Saltillo, Coahuila

Febrero 2025.

La avena es el sexto cultivo más importante a nivel mundial principalmente por el uso como alimento para el ganado bovino para carne y leche. Debido a su importancia económica es necesario desarrollar nuevas variedades con mayor rendimiento de forraje y de grano para ambientes adversos con sequía y suelos pobres en nutrientes. Para desarrollar una nueva variedad es crucial la evaluación de materiales *per se* y en cruzas para estimar efectos genéticos de la heterosis e identificar las mejores combinaciones híbridas para el desarrollo de poblaciones segregantes. Bajo este contexto, se realizaron dos estudios: 1) evaluación agronómica de 10 genotipos de avena en dos localidades con dos dosis de fertilización, durante el ciclo O-I 2022-2023, bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas y tres repeticiones; y 2) un plan de cruzas entre los 10 genotipos de avena, bajo un sistema dialélico que incluyó cruzas recíprocas, posteriormente se llevó a cabo la evaluación de 45 híbridos F_1 obtenidos, incluyendo los 10 progenitores, en el ciclo V-O 2023, en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. Los objetivos fueron evaluar los componentes de rendimiento de forraje y de grano de 10 genotipos de avena en dos localidades y bajo dos dosis de fertilización, adicionalmente estimar los valores de heterosis y heterobeltiosis de híbridos F_1 de avena. Los resultados del estudio 1 mostraron que, en Saltillo, los 10 genotipos son adecuados para producción de forraje, mientras que Obsidiana, Turquesa, Karma, Cuauhtémoc y Moneyda para producción de grano. Por otro lado, en Galeana, los genotipos Moneyda, Obsidiana, Karma y Juchitepec son ideales para forraje y grano. En el estudio 2, se observaron valores positivos y negativos de heterosis y heterobeltiosis. Las combinaciones 10x6, 8x2, 1x7, 6x7, 9x6, 4x2, 9x1 y 1x11 mostraron heterosis positiva en las variables peso seco total y en sus componentes, como hojas y tallos (g/planta), además del número de granos por panícula. Asimismo, las cruzas 10x6, 4x2, 8x10, 6x7 y 1x7 destacaron en heterobeltiosis para peso seco total, peso seco de hojas (g/planta), número de granos por panícula, número de espiguillas por panícula y número de tallos por planta.

Palabras clave: diversidad genética, heterosis, grano, forraje, cruzas.

ABSTRACT

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
POSTGRADUATE SUB-DIRECTORATE

ESTIMATION OF GENETIC EFFECTS OF 10 OAT GENOTYPES AND THEIR
HYBRID COMBINATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE BASE
POPULATION

Tesis

Presented by RODIMIRO HERNÁNDEZ GARCÍA
as a Partial Requirement to Obtain the Degree of
MASTER OF SCIENCE IN PLANT BREEDING

Saltillo, Coahuila

February 2025.

Oat is the sixth most important crop worldwide, primarily due to its use as feed for beef and dairy cattle. Due to its economic importance, it is necessary to develop new varieties with higher forage and grain yield for adverse environments with drought and nutrient-poor soils. To develop a new variety, the evaluation of materials *per se* and in crosses is crucial to estimate the genetic effects of heterosis and identify the best hybrid combinations for the development of segregating populations. Under this context, two studies were conducted: 1) agronomic evaluation of 10 oat genotypes in two locations with two fertilization doses during the 2022-2023 fall-winter cycle, under a randomized complete block design with a split-plot arrangement and three replications; and 2) a crossing plan among the 10 oat genotypes, using a diallel system that included reciprocal crosses, followed by the evaluation of 45 F1 hybrids obtained, including the 10 parents, during the 2023 spring-summer cycle, in a randomized complete block design with two replications. The objectives were to evaluate the forage and grain yield components of 10 oat genotypes in two locations and under two fertilization doses, as well as to estimate heterosis and heterobeltiosis values in oat F1 hybrids. The results of study 1 showed that, in Saltillo, the 10 genotypes are suitable for forage production, while Obsidiana, Turquesa, Karma, Cuauhtémoc, and Moneyda are suitable for grain production. On the other hand, in Galeana, the genotypes Moneyda, Obsidiana, Karma, and Juchitepec are ideal for forage and grain production. In study 2, both positive and negative heterosis and heterobeltiosis values were observed. The combinations 10x6, 8x2, 1x7, 6x7, 9x6, 4x2, 9x1, and 1x11 showed positive heterosis for total dry weight and its components, such as leaves and stems (g/plant), as well as the number of grains per panicle. Likewise, the crosses 10x6, 4x2, 8x10, 6x7, and 1x7 excelled in heterobeltiosis for total dry weight, dry weight of leaves (g/plant), number of grains per panicle, number of spikelets per panicle, and number of stems per plant.

Keywords: genetic diversity, heterosis, grain, forage, crosses.

INTRODUCCIÓN

La avena (*Avena sativa* L.) es un cultivo de importancia económica debido a su uso como alimento para el ganado principalmente en países de América del sur, como lo son, Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Ecuador, Perú y Uruguay (Ramírez *et al.*, 2013). En el caso de México, se reporta que no alcanza la autosuficiencia en su producción y recurre a importaciones de forraje y de grano, en su mayoría provenientes de Canadá, Australia y Estados Unidos (SIAP, 2023).

Por lo tanto, el desarrollo de nuevas variedades de avena es de suma importancia, lo anterior, para incrementar la producción agrícola de nuestro país y suplir las necesidades de la sociedad, así mismo, la parte industrial. Sin embargo, para desarrollar una nueva variedad, es esencial evaluar diversos materiales que pueden estar disponibles en el mercado para conocer sus características con relación a sus parámetros agronómicos y de rendimiento.

En ese sentido, dentro de un programa de mejoramiento genético la elección de los progenitores es fundamental, adicionalmente este proceso contempla una evaluación exhaustiva de las características agronómicas de los genotipos, así como su desempeño heterótico en combinaciones híbridas con otros genotipos, con la finalidad de discernir su potencial genético en términos de rendimiento y atributos morfo-fisiológicos, así mismo, tener en cuenta la variabilidad ambiental y climática (Camarena *et al.*, 2014). También es crucial una evaluación de materiales *per se* y sus cruzas para estimar efectos genéticos, como la aptitud combinatoria general (ACG), aptitud combinatoria específica (ACE) y la heterosis. Al respecto, el uso de cruzas dialélicas según los métodos de diseños dialélicos propuestos por Griffing (1956), resulta eficaz para obtener estos valores a partir de diversas fuentes de germoplasma.

Por otro lado, Shull (1909) definió la heterosis como el comportamiento promedio de un híbrido F_1 respecto a la media de los progenitores. La heterosis se manifiesta como un aumento en términos de rendimiento u alguna otra característica (Berlan, 2021). Por otra parte, Bouchetat y Mebrouk (2022) mencionan que la heterosis se puede expresar también como una disminución en el comportamiento de la F_1 , lo cual denominan como heterosis negativa en sus

resultados. Por lo tanto, la información sobre la heterosis es esencial para identificar combinaciones de genotipos e incrementar el porcentaje de genes favorables en una población básica mediante técnicas de hibridación entre variedades autógamas, agrupando caracteres deseados en un solo individuo. De esta manera, la explotación de la heterosis y la identificación de segregantes transgresivos son los pasos más relevantes en un programa de mejoramiento genético de avena. Con este estudio se busca generar conocimiento nuevo y documentar la existencia de la heterosis en cruza específicas de genotipos comerciales de avenas, determinar la variabilidad genética de los materiales, su grado de adaptación y productividad en diversas condiciones de suelo y fertilización nitrogenada, y finalmente con esta información tomar las mejores decisiones sobre los genotipos que mejor pueden considerarse como progenitores para el desarrollo de nuevas poblaciones en un programa de mejoramiento genético de avena para la región sureste de Coahuila.

Objetivos

Evaluar el rendimiento de forraje y de grano, y sus componentes en 10 genotipos de avena.

Estimar los valores de la heterosis en los híbridos producto de las cruza entre diferentes genotipos de avena en términos de forraje y grano.

Hipótesis

La evaluación agronómica y la estimación de los valores de la heterosis permitirán identificar genotipos sobresalientes y combinaciones híbridas para el desarrollo de una población base de avena con potencial para incrementar los rendimientos de forraje y grano.

REVISIÓN DE LITERATURA

Descripción botánica de la avena

La avena (*Avena sativa* L.) es un cereal que pertenece a la familia de las poáceas de ciclo de vida anual. Las plantas están constituidas por tallos que son rectos cilíndricos y presentan una estructura hueca lo que les proporciona flexibilidad y resistencia. Están compuestos por nudos y entrenudos, su altura puede variar entre 60 y 120 cm, dependiendo de las condiciones ambientales y del genotipo. Las hojas son planas, alargadas, con textura ligeramente áspera, que están dispuestas de forma alterna a lo largo del tallo, sus nervaduras están muy marcadas y son paralelas a lo largo de la lámina (SIAP, 2016). Las inflorescencias están organizadas en forma de panícula, cada panícula está compuesta por un número variable de espiguillas que albergan las semillas. La cantidad de espiguillas por panícula puede variar considerablemente dependiendo del cultivar y de las condiciones ambientales entre un rango de 20 a 150 espiguillas, cada espiguilla está formada por dos glumas y entre dos a cuatro antecios, los antecios están constituidos por una lemma y una pálea que son estructuras protectoras en el desarrollo de la semilla. El tipo de polinización es principalmente autógama, donde el polen fertiliza a los óvulos de una misma flor y de esta manera propicia la uniformidad genética de las poblaciones de plantas de avena (Flores-Juárez *et al.*, 2020). El grano es un fruto llamado cariopsis que consiste en la unión de la semilla con el pericarpio, esta estructura protege el contenido nutritivo, y permite que el grano se pueda almacenar por periodos de tiempo de más de 2 años, siempre y cuando se mantenga en condiciones óptimas de humedad y temperatura. El sistema radicular es de tipo adventicio ramificado que puede crecer entre 0.9 y 1.2 metros de profundidad desde la superficie del suelo, lo que hace que la planta sea más eficiente en la absorción de los nutrientes.

Producción de la avena

En el mundo se siembran aproximadamente 6.8 millones de hectáreas y se producen 22.6 millones de toneladas de avena, estos datos ubican al cultivo de avena como el sexto cereal más importante en la producción de forraje y grano, después del trigo (*Triticum aestivum* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L.), arroz (*Oryza*

sativa L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.) y maíz (*Zea mays* L.). La superficie sembrada ha disminuido en los últimos años debido a factores como la mecanización agrícola y la preferencia por cultivos más rentables como el maíz y el trigo (Rípodas, 2024). En cuanto a la producción de grano, Rusia lideró la producción mundial de avena con el 22.9 % de la superficie sembrada y el 16.7 % del volumen global. Seguido de Canadá y Australia que fueron el segundo y tercer productor, respectivamente. México, por su parte, ocupó el 28º lugar en el ranking mundial, con una producción de 106,440 toneladas de grano y 10 millones 502 mil toneladas de forraje y un rendimiento promedio de 16 t ha⁻¹ de forraje verde y de 2.1 t ha⁻¹ de grano. Sin embargo, con este volumen no se cubre la demanda del sector ganadero, lo que conlleva a la necesidad de importar 133 mil toneladas de países como Australia, Chile, Canadá y Estados Unidos. En México, los principales estados productores de avena varían dependiendo de si el cultivo se destina a forraje o a grano. En cuanto a la avena para forraje verde, los estados más destacados con el 7.9 % de la producción total son Chihuahua, Durango, Zacatecas, Guanajuato y el Estado de México, que cuentan con amplias superficies de cultivo destinadas a satisfacer la demanda de forraje, principalmente para el ganado. Por otro lado, la producción de avena para grano, los estados líderes con el 0.3 % de la producción total son Baja California, Chihuahua, Durango, Guanajuato y Sonora, que aprovechan sus sistemas de riego y condiciones climáticas favorables para obtener altos rendimientos en este tipo de cultivo (SIAP, 2023). Con respecto al área de influencia directa de la UAAAN, que es el estado de Coahuila se siembran 17,856.50 hectáreas y se producen 506,648.63 toneladas de forraje verde, las cuales se destinan principalmente para la alimentación del ganado bovino, especialmente en sistemas de producción lechera y de engorda. Además, una parte de este forraje es utilizada en la alimentación de ovinos y caprinos.

Principales usos de la avena

En el ámbito pecuario, la avena desempeña un papel crucial como forraje para el ganado, su valor nutricional rica en proteínas y energía la hace adecuada para la alimentación de bovinos, ovinos, y equinos. La avena se utiliza tanto en forraje

verde como en ensilaje o heno, convirtiéndose en un recurso alimenticio clave en regiones con climas secos o fríos. El forraje de avena se caracteriza por su alta digestibilidad dado que puede alcanzar entre un 75 a 80 % en etapas tempranas de crecimiento, y contenido energético entre 1.8 y 2.3 Mcal de energía metabolizable por kilogramo de materia seca. Estos valores superan a otros cereales de grano pequeño en cuanto a la calidad de su fibra. Además, el grano de avena ofrece una alta cantidad y calidad de proteínas, carbohidratos, fibras solubles, lípidos, antioxidantes, compuestos fenólicos, minerales y vitaminas del grupo B (Sosa *et al.*, 2020; Paudel *et al.*, 2021). Por lo que este cereal también se utiliza ampliamente en el consumo humano, en forma de cereales, bebidas, galletas y pan. En el contexto de la agricultura sostenible, el cultivo de la avena se ha convertido en una herramienta clave para la conservación de suelos, debido a su sistema radicular profundo que permiten capturar nutrientes residuales, mejorar la estructura del suelo, reducir el riesgo de erosión y, minimizar la aparición de malezas (Vargas *et al.*, 2022).

Importancia económica de la avena en México

En México la avena es un cultivo que se utiliza principalmente como forraje para la alimentación de ganado lechero y de engorda. Debido a su importancia en la producción pecuaria, la avena es fundamental para la seguridad alimentaria del país ya que contribuye de manera significativa a la economía rural. Su capacidad de adaptarse a diversos climas en zonas áridas y semiáridas, permiten a los pequeños y medianos productores obtener ingresos estables. El uso de la avena como forraje en épocas de escasez da pauta a mantener la productividad ganadera, al disminuir la dependencia de insumos costosos. Este cultivo, debido a su alta demanda y su bajo costo de producción por hectárea que oscila entre \$8,000 y 12,000 MXN, genera empleo en zonas rurales, lo que fortalece la economía local y apoya a las familias de los agricultores (Ramírez-Ordoñez *et al.*, 2013). En 2022 el cultivo aportó 7.9 % de la producción nacional de forrajes, consolidándose como un recurso importante en la agricultura forrajera. El 53.0 % de la producción de forraje verde y grano se concentran entre los meses de noviembre y diciembre. Por lo tanto, en el mes de octubre hay mayor escasez de

forraje verde y grano, por lo que se importa el 71.0 % y 26.0 %, respectivamente, del total anual requerido. En cuanto a las exportaciones, estas alcanzan su punto máximo entre mayo y junio con un 53.0 % de forraje verde y en los meses de marzo y diciembre con 11.5 % de grano (SIAP, 2023).

El éxito del incremento de la producción de avena en México ha sido en gran medida el resultado de las nuevas variedades generadas, ya que han permitido enfrentar los desafíos fitopatológicos como las royas del tallo y de la hoja. Por ello, es crucial el mejoramiento genético de avena para asegurar la continuidad en la generación de nuevas variedades, garantizar así una mejor producción del cultivo en el país (Villaseñor-Mir *et al.*, 2021).

Calidad nutricional de la avena

La planta de avena se utiliza en diversas etapas de crecimiento para el consumo animal, desde la germinación para la alimentación de especies menores, hasta la etapa fenológica del grano lechoso-masoso para ensilados, por lo que la calidad nutricional del forraje varía según la etapa fenológica en la que se coseche. Los momentos óptimos para realizar los cortes es entre las etapas de grano lechoso-masoso, ya que permiten obtener los valores más adecuados en la calidad nutricional con 21 % de proteína cruda (PC), 54.0 % de fibra detergente neutra (FDN) y rendimiento de forraje verde de 19.0 t ha⁻¹ (Espitia *et al.*, 2012). Sin embargo, cuando la cosecha se realiza en etapas posteriores, como es el caso de la madurez fisiológica, el forraje de avena aún presenta buena calidad, debido al efecto de dilución de la fibra al aumentar la proporción de grano en la planta, con contenidos de 10.5 % PC, 61.4 % de FDN, 1.63 Mcal kg⁻¹ MS de ENL, y rendimiento de forraje seco de 3.0 t ha⁻¹. Estos cambios en el rendimiento y la calidad del forraje a lo largo de las diferentes etapas fenológicas permiten que el uso del cultivo de avena sea versátil y se adapte a las necesidades nutricionales del ganado. De este modo, el cultivo es de gran importancia para la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas de producción animal, ya que proporciona un alimento nutritivo y es poco exigente en su sistema de producción (Ramírez-Ordoñez *et al.*, 2013).

Diversidad genética de la avena

La diversidad genética se refiere a la variación hereditaria dentro y entre poblaciones de una especie. Esta variabilidad, es esencial en los programas de mejoramiento genético, ya que proporciona los recursos necesarios para desarrollar variedades resilientes, más productivas, con resistencia a enfermedades y tolerancia a estrés ambiental. En el caso de la avena no es la excepción ya que depende de esta diversidad para mejorar su productividad y sostenibilidad. Por lo que se ha recurrido al uso de especies silvestres como *Avena sterilis* y *Avena byzantina* para enriquecer el germoplasma disponible, y de esta forma mejorar varias características claves del cultivo (Condón y Rossi, 2018).

En estudios de diversidad genética de la avena han reportado 250 caracteres agronómicos hereditarios diferentes, mediante el estudio de 49 accesiones de varias especies (*Avena sativa* L., *A. strigosa* Schreb, *A. abyssinica* Hochst. y *A. byzantina* Coch), que fueron obtenidas de la colección de Recursos Fitogenéticos de la Estación de Investigación Vavilov. En este estudio se reportaron rendimientos entre 55 a 276 g/m², número de granos por espiga de 23 a 75 granos, número de espigas que oscilaron de 15 a 60 espigas, longitud de panícula que va de 13 a 26 cm, y altura de planta de 50 a 165 cm (Popov, 2022). A través de esta evaluación se identificó fuentes valiosas de diversidad genética y que estas pueden ser utilizadas en los programas de mejoramiento para desarrollar nuevas variedades.

Evaluaciones agronómicas

En un programa de mejoramiento genético, la elección de los progenitores para formar poblaciones segregantes es fundamental, este proceso conlleva a una evaluación exhaustiva de las características individuales de los genotipos, con la finalidad de discernir su potencial en términos de rendimiento y atributos morfo-fisiológicos, teniendo en cuenta la variabilidad ambiental y climática (Camarena *et al.*, 2014). Por lo tanto, es esencial evaluar diversos materiales que pueden estar disponibles en el mercado para conocer sus características. Existen estudios que reportan un comportamiento diferencial en rendimiento de forraje

verde cuando son sometidos a dosis diferentes de fertilización. Por ejemplo, Torres *et al.* (2016) obtuvieron un rendimiento de biomasa seca de 8.5 t ha^{-1} con fertilización química y de 3 t ha^{-1} sin fertilización en un suelo franco-arenoso con una salinidad menor a 4 dS/m .

En otras investigaciones de avena, se estudió la variedad Dorada bajo tres dosis de fertilización nitrogenada (50 , 100 y 150 kg N ha^{-1}) para cuantificar el efecto en la acumulación de biomasa. Los resultados mostraron que el aumento de la dosis de N se reflejó en una mayor producción de biomasa, con un incremento del 40.0% en la dosis de 150 kg N ha^{-1} en comparación con la dosis de 50 kg N ha^{-1} . Sin embargo, la mayor eficiencia en la producción de biomasa se alcanzó con la dosis de 100 kg N ha^{-1} , que proporcionó un equilibrio entre el rendimiento y el uso eficiente del nitrógeno. Las dosis altas no generaron incrementos significativos adicionales, por lo que 100 kg N ha^{-1} es la dosis óptima para maximizar la biomasa en la variedad Dorada según Gutiérrez *et al.* (2018).

Por otro lado, Dietz *et al.* (2016) evaluaron el impacto de distintas dosis de fertilización nitrogenada (0 , 50 , 100 y 150 kg N ha^{-1}) en la generación de biomasa aérea y el rendimiento de la avena. Los resultados mostraron que el aumento de la fertilización nitrogenada incrementó significativamente la biomasa aérea. A una dosis de 50 kg N ha^{-1} , la producción de biomasa aérea fue de 6.5 t ha^{-1} , mientras que al aplicar 100 kg N ha^{-1} , la biomasa aumentó a 9.2 t ha^{-1} , lo que representó un incremento del 41.0% . En la dosis más alta, 150 kg N ha^{-1} , la biomasa alcanzó las 10 t ha^{-1} , pero la ganancia adicional fue menor en comparación con la dosis de 100 kg N ha^{-1} , con un aumento del 8.7% .

En otro experimento, que consistió en la evaluación de los genotipos Turquesa, Obsidiana, Karma, Avemex, Chihuahua, Paramo y Menonita bajo dos dosis de nitrógeno (60 y 120 kg N ha^{-1}). Los resultados indicaron que el incremento en la fertilización nitrogenada condujo a un aumento en el rendimiento del grano. Con la dosis de 60 kg N ha^{-1} , el rendimiento promedio de los genotipos fue de 3.5 t ha^{-1} , mientras que a 120 kg N ha^{-1} el rendimiento promedio estuvo entre 4.8 t ha^{-1} . Indicando que la dosis de 120 kg N ha^{-1} fue más eficiente para maximizar

el rendimiento en comparación con la de 60 kg N ha⁻¹ (Hernández-Campuzano, *et al.*, 2018).

Mejoramiento genético en avena

El incremento de la producción en cultivos forrajeros se ha logrado mediante la constante mejora genética de estas especies durante aproximadamente un siglo. Los objetivos principales en los programas de mejoramiento genético de cultivos forrajeros es aumentar los caracteres de rendimiento de materia seca, calidad, digestibilidad y resistencia a enfermedades (Kingston *et al.*, 2013). Al respecto, en el mejoramiento genético de la avena el objetivo es incrementar la producción de forrajes de buena calidad mediante el desarrollo de nuevas variedades que posean mayores rendimientos en forraje y grano, resistencia a enfermedades como la roya de la hoja (*Puccinia coronata*), óidio (*Blumeria graminis*) y con mejor adaptación a condiciones adversas, tales como la sequía, las bajas temperaturas y alta salinidad, entre otras.

Un programa de mejoramiento genético comienza con la creación de poblaciones que presenten una amplia variabilidad genética (Rivera *et al.*, 2018). Esto se puede generar mediante la introducción de germoplasma, que implica incorporar material genético de distintas regiones geográficas, como variedades silvestres, cultivos locales o líneas avanzadas, que aportan nuevas características. Así mismo, se puede crear mediante la hibridación, que consiste en realizar cruza controladas entre genotipos seleccionados, combinando las características favorables de los progenitores (Warchol *et al.*, 2023). Además, las mutaciones inducidas mediante el uso de agentes mutagénicos tanto físicos como químicos, que también es una más de las técnicas utilizadas para generar diversidad genética en plantas, debido a que los cambios que ocurren en el organismo en muchos de los casos son heredables (Salas, 2015).

Los métodos de selección más comunes que se utilizan en el mejoramiento genético son: la selección masal, que consiste en seleccionar un gran número de individuos con características fenotípicas similares, posteriormente se cosechan en masa y se mezclan su semilla para constituir la generación siguiente. Este método es eficiente en poblaciones heterogéneas. Sin embargo, su efectividad

puede ser menor si los individuos seleccionados no presentan una constitución genética homogénea y si los caracteres son de baja heredabilidad. Un segundo método es el genealógico o de pedigrí, que consiste en llevar un registro detallado de las plantas seleccionadas a lo largo de varias generaciones, es más laborioso que el masal, pero permite obtener líneas puras con características específicas, y ofrece un control riguroso sobre la descendencia de las plantas seleccionadas. El tercer método es el bulk, que consiste en la cosecha en masa en las primeras generaciones (F_1 y F_2), las semillas se cosechan y se mezclan y en las generaciones sucesivas (F_3 , F_4 , etc.) se cultivan bajo condiciones representativas de la región, hasta alcanzar un nivel de homocigosis adecuado, es un método más sencillo y menos costoso en las primeras generaciones en comparación con el pedigrí (Vallejo, 2002). El cuarto método es el de descendencia de semilla única (SSD) consiste en seleccionar una semilla de cada planta en cada generación segregante hasta alcanzar un alto grado de homocigosis, este método reduce significativamente el tiempo necesario para obtener líneas homocigotas, ya que la evaluación y selección de genotipos se realiza después de alcanzar alto nivel de la homocigosis (Camarena *et al.*, 2014).

En México se han desarrollado y registrado 44 variedades de avena. Aproximadamente 25 de estas variedades se han originado mediante hibridación entre materiales nacionales y materiales introducidos, principalmente de Estados Unidos y Canadá. El proceso de mejoramiento ha utilizado el método de selección, el cual incluye técnicas como la selección por pedigrí y la selección masal, que ha permitido identificar y seleccionar genotipos con características agronómicas deseadas (Villaseñor-Mir *et al.*, 2021; SNICS, 2024).

Hibridación en plantas autóгамas

La hibridación se basa en el cruce de individuos con genotipos diferentes para combinar las características genéticas deseadas en una nueva generación. Es una estrategia clave en el mejoramiento de especies autóгамas, ya que permite la creación de variedades superiores al seleccionar cuidadosamente los progenitores en función de las características que se desean fijar. La hibridación puede combinar características biológicas de especies distantes, lo que amplía

la variabilidad genética y puede llevar a la creación de nuevos genotipos. En este sentido existen dos tipos de hibridación, la primera es la interespecífica, que ocurre entre especies diferentes, ya que permite crear nuevas especies con una gran variabilidad genética y lograr integrar los genes de ambos progenitores, resultando en genotipos con variabilidad de características fenotípicas y genotípicas. Este proceso puede también provocar cambios en el genoma, produciendo variaciones como diploides, triploides, tetraploides y generando nuevas formas de ADN recombinante en la descendencia. Por otra parte, está la intraespecífica, que ocurre entre variedades de la misma especie y que genera una variación genética más limitada (Sánchez *et al.*, 2021).

La hibridación en la avena se utiliza para mejorar características agronómicas esenciales, como el rendimiento, la resistencia a enfermedades y la adaptación a diferentes ambientes. Este proceso permite combinar rasgos favorables de diversos genotipos, generando variedades más productivas y resilientes ante factores bióticos y abióticos. Además, se emplea para desarrollar variedades que se ajusten mejor a condiciones climáticas específicas, como sequías o suelos de baja fertilidad. La hibridación no solo busca aumentar el rendimiento, sino también mejorar el valor nutritivo de la avena, optimizando el perfil de aminoácidos y otros nutrientes, lo que se ha discutido en varios estudios (Sánchez *et al.*, 2021). El éxito en el mejoramiento por hibridación se logra cuando al menos una de las líneas parentales muestra alta ACG, lo que asegura un buen rendimiento. En contraste, una baja ACG y ACE en las líneas resultará en un bajo rendimiento (Guerrero-Guerrero *et al.*, 2011).

Cruzamientos dialélicos

Los cruzamientos dialélicos es un método de apareamiento dentro del mejoramiento genético de plantas, que consiste en realizar todas las cruzas posibles entre un número dado de progenitores, dando como resultado una serie de progenies. No obstante, debido a la dificultad que implica realizar los cruzamientos en plantas autógamas se utilizan menos de 10 progenitores.

Los métodos más comunes para analizar los cruzamientos dialélicos son los propuestos por Griffing (1956). Estos análisis proporcionan una comprensión

profunda del control genético de los caracteres de interés, estiman la heterosis, facilitan la selección de las mejores combinaciones genéticas, con el propósito de seleccionar los mejores progenitores para ser utilizado como fuentes de germoplasma en la formación de poblaciones segregantes (Guzmán *et al.*, 2017). De este modo el análisis dialélico recopila información esencial sobre la aptitud combinatoria (AC) que describe la capacidad de un individuo o población para cruzarse con otros siendo esta capacidad evaluada a través de la progenie resultante. De esta manera la aptitud combinatoria general (ACG) se refiere al comportamiento promedio de una línea a través de todos los cruzamientos en que participa, esto ayuda a seleccionar los progenitores más adecuados para los programas de mejoramiento mientras que la aptitud combinatoria específica (ACE) se refiere al comportamiento promedio de una cruce en específica de progenitores y permite evaluar la eficacia de las combinaciones híbridas en términos de rendimiento y otros rasgos deseables en comparación con el promedio de los progenitores (Contreras-Rojas *et al.*, 2023). Varios autores documentan que los valores de ACG son atribuidos a la varianza genética de efectos aditivos de los genes y la ACE a los efectos no aditivos, como la dominancia y la epistasis por la cual son fundamentales para identificar progenitores que podrían ser útiles en el desarrollo de genotipos (Hernández-Pérez *et al.*, 2011).

En estudios sobre cruzamientos dialélicos en la avena se han reportado que el contenido de aceite es explicado principalmente por el tipo de acción genética aditiva, con algunos efectos de dominancia y en algunos casos de segregación transgresiva en los caracteres del grano. Por la cual ciertos genotipos tienen una fuerte capacidad para transmitir estos rasgos a sus descendientes. De manera similar la ACE también fue importante, mostrando que algunos cruzamientos específicos tuvieron una mejora significativa en las características deseadas, como el tamaño del grano y el contenido de aceite (Golden, 2000). En arroz, que también es una planta autógama se reporta valores más altos de heterosis en los híbridos que involucraban progenitores con una alta ACG, particularmente en rasgos como el número de espiguillas por panícula y el peso de los granos. Sin

embargo, algunos híbridos también mostraron altos valores de ACE donde la heterosis de algunos híbridos superaron en hasta un 50 % a los progenitores (Huang *et al.*, 2015).

Heterosis

El concepto heterosis se atribuye a Shull (1909) como el comportamiento promedio de un híbrido con respecto al promedio de los progenitores. Generalmente la heterosis se ha reportado como positiva cuando se manifiesta como un aumento en el tamaño, la fructificación, velocidad de desarrollo, resistencia a enfermedades y plagas. Sin embargo, no siempre se manifiesta como un aumento en el rendimiento o en otras características deseables. En algunos casos la F_1 , es decir, la primera generación híbrida puede mostrar una disminución en ciertos rasgos lo que se conoce como heterosis negativa (Prakash *et al.*, 2013). Esta expresión negativa puede ocurrir cuando las combinaciones de genes entre los progenitores no interactúan de manera favorable por los efectos de incompatibilidades genéticas o de las presencias de genes recesivos desfavorables que se expresan en la descendencia híbrida, lo que resulta en un rendimiento inferior respecto al esperado. Por lo tanto, la heterosis no siempre es positiva, su expresión puede variar dependiendo de los progenitores involucrados y de las condiciones ambientales. Por lo tanto, aunque la heterosis es un fenómeno presente en muchas partes, no siempre ocurre en todas las cruzas entre padres, ni necesariamente proviene de progenitores con buen rendimiento individual.

La teoría detrás de la heterosis sugiere que la hibridación de genotipos genéticamente diversos puede resultar en una recombinación de alelos favorables, lo que genera un fenotipo y genotipo más resistente o sobresaliente en comparación con los parentales. Este efecto se debe a la acumulación de genes favorables, lo que se traduce en una mayor eficiencia en la utilización de recursos y un incremento en la productividad. En híbridos de avena se han reportado heterosis positiva para el rendimiento de forraje verde con valores que van de 5.4 % hasta 1702.1 % (Kapoor *et al.*, 2017).

En otros estudios se reportan heterosis positiva en caracteres como el rendimiento biológico con 76.21 %, altura de la planta con 12.75 %, tasa de crecimiento con 64.4 % y número de macollos por planta de 121.2 % (Juhaishi *et al.*, 2020).

De esta manera la heterosis también conocida como vigor híbrido, es una herramienta clave en el mejoramiento genético de plantas, ya que permite potenciar aspectos como la productividad, la diversidad genética, la resistencia a enfermedades, la calidad del grano, etc. Además, permite la explotación de variaciones genéticas existentes en especies silvestres y cultivadas (Chauhan *et al.*, 2018). Por lo que es crucial disponer de información detallada sobre el grado de heterosis para identificar combinaciones de cruzas con un alto potencial que puedan ser explotadas en programas de hibridación intervarietal. Esta información permite a los mejoradores identificar las mejores combinaciones parentales para maximizar el vigor híbrido en la siguiente generación (Sharma *et al.*, 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los trabajos de investigación consistieron en dos estudios. En el primero, se evaluó el comportamiento agronómico de 10 genotipos comerciales de avena en dos localidades. En el segundo, se realizaron las cruzas y se estimaron los valores de heterosis y heterobeltiosis de los híbridos productos de las cruzas entre los genotipos comerciales de avena.

Estudio 1: Evaluación agronómica de los genotipos de avena

Ubicación del área experimental

El estudio se llevó a cabo durante el ciclo otoño-invierno 2022-2023 en dos localidades: Localidad 1) el campo experimental el Bajío de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en Saltillo, Coahuila, ubicado entre las coordenadas 25° 21' 23.55" latitud N, 101° 25' 16" longitud O, a una altitud de 1763 m, con un clima semiseco, con temperatura media anual entre 18 y 22 °C, con una precipitación media anual de 400 mm. Y la Localidad 2) el campo experimental Humberto Treviño Siller de la UAAAN en el ejido Navidad, Galeana, Nuevo León, ubicado entre las coordenadas 25° 02' 20.7" latitud N, 100° 37' 30.5" longitud O, a una altitud de 1881 m. con un clima semiseco, con temperatura media anual de entre 16 y 18 °C, con una precipitación media anual de 450 mm (INEGI, 2024).

Material genético

En el estudio se incluyeron 10 genotipos comerciales de avena, los cuales fueron elegidos por sus características de adaptación a altitudes de 1500 a 2600 m, de buena producción de forraje seco entre 6 a 10 t ha⁻¹, rendimiento de grano entre 2.5 y 4.5 t ha⁻¹, tolerancia a enfermedades y duración del ciclo del cultivo. Estos materiales fueron adquiridos de empresas semilleras de los estados de Coahuila, Chihuahua, Baja California, San Luis y Estado de México (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características agronómicas de los genotipos comerciales de avena evaluadas durante el ciclo O-I 2022-2023 en Saltillo, Coahuila y Galeana Nuevo León.

Genotipos	Núm.	Altitud	Usos	RGRA	RFS	DF	RR	HC
Moneyda	1	1,800-2,500	G-F	2.5-4.0	6-8	90-110	MR	P
Bachiniva	2	1,600-2,400	G-F	2.8-4.2	6-8	100-120	AR	P
Obsidiana	3	1,500-2,300	G-F	3.0-4.5	7-10	74-35	AR	P
Turquesa	4	1,800-2,600	G-F	3.5-4.5	7-10	90-100	MR	P
Carmen	6	1,700-2,400	G-F	3.0-4.2	6-8	100-115	MR	P
Juchitepec	7	1,800-2,400	G-F	2.8-4.2	7-9	100-120	MR	P
Babícora	8	1,800-2,600	G-F	3.0-4.2	7-9	90-110	AR	P
Gema	9	1,700-2,300	G-F	3.0-4.0	7-9	95-115	AR	P
Cuauhtémoc	10	1,600-2,500	G-F	3.0-4.0	6-8	95-110	AR	P
Karma	11	1,800-2,500	G-F	3.2-4.5	7-10	95-110	MR	P

RGRA= Rendimiento de grano en t ha⁻¹; RFS= Rendimiento de forraje seco en t ha⁻¹; DF= Días a floración; RR= Resistencia a royas; HC= Habito de crecimiento; G-F= Grano-Forraje; MR= Moderadamente resistente; AR= Altamente resistente; P= Primavera. Fuentes (Villaseñor-Mir *et al.*, 2023; Espitia *et al.*, 2007; Martínez *et al.*, 2013; Villaseñor *et al.*, 2009; Leyva-Mir *et al.*, 2018).

Preparación del terreno

Los trabajos de preparación del suelo consistieron en la realización de barbecho, doble paso de rastra, surcado y tabloneo.

Diseño experimental

Los genotipos fueron distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con arreglo de tratamientos en parcelas divididas con tres repeticiones; la parcela principal fueron las dosis de fertilización y la subparcela fueron los genotipos, para las dos localidades (Badii *et al.*, 2007). Las parcelas experimentales consistieron en 5 camas de 5 m de longitud separadas a 0.90 m, con dos hileras por cama, con un área total de 22.5 m², la parcela útil fue 2 m lineal de una cama central para la estimación de forraje y dos camas centrales de 5 m lineal para la estimación del rendimiento de grano.

Modelo lineal:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \tau_j + n_{ij} + \delta_k + (\tau\delta)_{jk} + e_{ijk}$$

para $i = 1, 2, \dots, r, j = 1, 2, \dots, p, k = 1, 2, \dots, q$

Donde

Y_{ijk} = valor observado de cada unidad experimental, μ = media de la población, β_i = efecto del bloque i (con r repeticiones), τ_j = efecto del tratamiento aplicado a las parcelas grandes, n_{ij} = error asociado a la parcela grande, δ_k = efecto del subtratamiento k dentro de la parcela grande, $(\tau\delta)_{jk}$ = interacción entre el tratamiento j aplicado en la parcela grande y el subtratamiento k aplicado en la subparcela y e_{ijk} = error experimental asociado con la subparcela dentro de la parcela principal.

Siembra

Las siembras se realizaron el 16 de diciembre del 2022 para la localidad 1 y el 10 de febrero del 2023 para la localidad 2, con una densidad de 100 kg de semilla por ha^{-1} . La cual consistió en colocar y distribuir la semilla de manera uniforme en el fondo y a lo largo de las hileras y posterior tapar con rastrillo, todo de manera manual.

Dosificación de fertilización

Se realizaron muestreos de suelos en cada localidad con base a la metodología del laboratorio de Fertilab®, posteriormente las dos muestras fueron enviadas al laboratorio de análisis de suelos y nutrición Fertilab® ubicada en la Cd. de Celaya, Guanajuato, México, para su análisis (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características edáficas para cada localidad en base a los resultados análisis de suelo del laboratorio de Fertilab®.

Propiedades	Localidad	
	Saltillo, Coahuila	Galeana, Nuevo León
Materia orgánica (%)	4.17	2.93
Textura	Franco	Franco
Potencial de hidrogeno (pH)	8.54	7.58
Carbonatos totales	41.7	73.4
Conductividad eléctrica (CE dS/m)	1.30	5.44
Nivel de Ca (ppm)	2763	12679

En función de los resultados del análisis de suelo se aplicaron dos dosis distintas de fertilización para cada localidad:

Localidad 1; Fert-1) dosis de 230-15-20 más 1 kg de Ultrasol® micro Rexene® BSP Mix, estas cantidades de nutrientes fueron definidas para alcanzar un rendimiento objetivo de 7.0 t ha⁻¹ de grano, Fert-2) dosis de 11-10-25 que fueron las cantidades de nutrientes disponibles en el suelo.

Localidad 2; Fert-3) dosis de 250-60-30 más 2 kg de Ultrasol® micro Rexene® BSP Mix, estas cantidades de nutrientes fueron definidas para alcanzar un rendimiento objetivo de 7.0 t ha⁻¹ de grano, Fert-4) dosis de 3-10-40 que fueron las cantidades de nutrientes disponibles en el suelo.

Los momentos de fertilizaciones se realizaron antes de la siembra donde se aplicó el 50 % de N, con el 100 % de P y K. El 50 % restante del N fueron aplicados en la etapa de inicio de encañe. Los fertilizantes foliares Ultrasol® se aplicaron cada 15 días después de la siembra, como fuentes de fertilizantes se utilizó Urea, MAP, Cloruro de Potasio y Ultrasol® micro Rexene® BSP Mix.

Riegos

Fueron aplicados 9 riegos por aspersión con una duración de 8 horas por riego en las dos localidades. En la localidad 1, los riegos fueron aplicados en las fechas 17 de diciembre 2022, 31 de diciembre 2022, 15 de enero 2023, 30 de enero 2023, 14 de febrero 2023, 1 de marzo 2023, 16 de marzo 2023, 31 de marzo

2023 y 15 de abril 2023, que correspondieron a las etapas fenológicas de germinación, emergencia, cuatro hojas, amacollamiento, principio de encañe, encañado, principio de espigamiento, principio de llenado de grano y final de llenado de grano, respectivamente. En la localidad 2, los riegos fueron aplicados en las fechas 11 de febrero 2023, 25 de febrero 2023, 12 de marzo 2023, 27 de marzo 2023, 11 de abril 2023, 26 de abril 2023, 11 de mayo 2023, 26 de mayo 2023 y 10 de junio 2023, que correspondieron a las etapas fenológicas de germinación, emergencia, cuatro hojas, amacollamiento, principio de encañe, encañado, principio de espigamiento, principio de llenado de grano y final de llenado de grano, respectivamente.

Control de malezas

El control de malezas de hoja ancha se realizó mediante la aplicación de herbicida químico 2, 4-D Amina a una dosis de 1.5 L en 200 L de agua por ha⁻¹. El herbicida se aplicó cuando las malezas se encontraban en la etapa de tres a cuatro hojas verdaderas y el cultivo en la etapa fenológica de amacollamiento.

Control de plagas y enfermedades

En las dos localidades, se presentaron alta incidencia de plaga conocida comúnmente como diabrotica (*Diabrotica spp.*), un insecto que puede causar daños significativos en el cultivo de avena al alimentarse de las raíces y otras partes de la planta. Para su control, se utilizó PERMEFOS® de ingrediente activo Clorpirifos a una dosis de 0.4 L en 200 L de agua por ha⁻¹. También se observó incidencia baja de enfermedades, sin embargo, no se realizó control de enfermedades.

Variables evaluadas

Altura de planta (ALTP): cuando los genotipos alcanzaron la etapa de madurez fisiológica se midieron la altura de las plantas desde la superficie del suelo hasta el extremo distal de la panoja mediante una cinta métrica en cm.

Días a espigamiento (DESP): Se registró el número de días que transcurrieron desde la siembra hasta que los materiales alcanzaron la etapa fenológica de espigamiento (Z5.0-Z5.9) con base a la escala propuesta por Zadoks *et al.* (1974).

Rendimiento de forraje seco total (RFST): Cuando los genotipos alcanzaron la etapa de grano lechoso masoso, se cortaron las plantas a 5 cm sobre el nivel del suelo de 2 m lineales de una cama central de cada parcela. Las muestras fueron colocadas en el asoleadero de cereales de la UAAAN y cuando alcanzaron un peso seco constante se pesaron las muestras con una balanza digital. Este valor se registró en g y se transformó a RFST t ha⁻¹.

Peso seco de tallo (FST): De las muestras secadas se separaron los tallos y se registraron los pesos en g utilizando con una balanza digital, y posteriormente se determinó el FST t ha⁻¹.

Peso seco de hojas (PSH): Se obtuvo al separar las hojas de las muestras secadas. Se registró su peso en g con una balanza digital. Este valor se convirtió a PSH t ha⁻¹.

Peso seco de panojas (PSPA): Se calculó al separar las panojas de las muestras secadas. Se registró su peso en g utilizando una balanza digital, convirtiendo posteriormente este valor a PSPA t ha⁻¹.

Numero de panojas por m² (NPA): De las muestras cosechadas, se contaron el número de panojas de cada muestra, y posteriormente se ajustó a número de panojas/m².

Rendimiento de grano (RGRA): Cuando los genotipos alcanzaron la etapa de madurez fisiológica (Z9.0-Z9.9), se cosecharon las plantas de 2 camas centrales por parcela de 5 metros de longitud. Posteriormente se trillaron con una maquina estacionaria, el material trillado se limpió y se registró el peso en g y se transformó en RGRA t ha⁻¹ ajustado con una humedad del 12.0 %.

Estudio 2: Plan de cruas entre los genotipos de avena y evaluación de los híbridos F₁.

Ubicación del área experimental

El segundo estudio se llevó a cabo en el invernadero No. 2 del Departamento de Fitomejoramiento de la UAAAN, en Saltillo, Coahuila, ubicado entre las coordenadas 25° 35' 55.23" latitud N, 101° 03' 09" longitud O.

Material genético

Los materiales genéticos consistieron en las semillas de los 10 genotipos comerciales de avena que se evaluaron en el estudio 1 (Cuadro 1).

Diseño de siembra

Cada parcela estuvo compuesta de una cama de un 1 m de longitud y 0.90 m de ancho con tres hileras sobre la cama, un área de 2.7 m² y entre cada parcela tuvo una separación de 0.5 m.

Siembra

La siembra se realizó de manera manual donde se depositó una semilla a una profundidad de 3 cm y a una distancia de 10 cm entre plantas. Se realizaron en cuatro fechas de siembra durante el ciclo otoño-invierno 2022-2023 para cada parcela, la primera siembra se realizó el 15 de diciembre de 2022, posteriormente las siguientes siembras se realizaron con intervalos de 10 días entre cada fecha, esto con el objetivo de sincronizar la floración entre los genotipos.

Fertilización

Para la fertilización se utilizó una dosis total de 230-80-30, donde se aplicó el 50 % de N con el 100 % de P y K antes de la siembra y el 50 % restante del N se aplicó en la etapa de inicio de encañe. Como fuentes de fertilizantes se utilizó Urea, MAP y cloruro de Potasio.

Riegos

Los riegos se realizaron mediante el sistema de goteo, con dos cintillas por cama, en la cual se regaron las plantas con un periodo de 5 horas cada 7 días.

Control de malezas

El control de malezas se realizó manualmente cuando se observó incidencia en el cultivo.

Control de plagas y enfermedades

Se observó presencia de la plaga gusano trozador cuando el cultivo se encontraba en la etapa de amacollamiento (Z2.0-Z2.9). Por lo que se controló mediante la aplicación de PERMEFOS® con ingrediente activo Clorpirifos a una dosis de 0.4 L en 200 L de agua por ha⁻¹. Se observó presencia de royas de la hoja y del tallo en algunos genotipos de avena sin embargo no se realizó control.

Diseño de cruzamientos

El sistema de apareamientos se realizó mediante cruzamientos dialélicos, mediante 10 genotipos comerciales de avena como progenitores, incluyendo los cruzamientos recíprocos según el método descrito por Griffing (1956). De acuerdo con la fórmula para determinar el número de progenies $p(p-1)$, se esperaba obtener 90 híbridos (Kang, 2003); sin embargo, solo se lograron 27 cruza, de las cuales 14 fueron directas y 13 fueron recíprocas.

Emasculaciones y cruzamientos

Las emasculaciones de las flores se realizaron con base a la metodología propuesta por Fehr (1991). Que consistió en seleccionar las panículas cuando se observaron con más de 10 espiguillas expuestas de la vaina de la hoja bandera etapa que corresponde al inicio de floración (Z5.0-Z5.9), posteriormente mediante una pinza y tijera se diseccionó la vaina de la hoja bandera para exponer los floretes inmaduros, por cada florete inmaduro se retiraron las glumas y se extrajeron las anteras. Finalmente, las panículas emasculadas fueron cubiertas con bolsas de papel encerado lo que permitió proteger a los floretes de posibles contaminaciones y estos fueron etiquetadas con el nombre del genotipo y la fecha de emasculación.

Las cruza se realizaron al día siguiente o dos días después de la emasculación entre las 11:00 am y 4:00 pm, la cual dependió del grado de la madurez de los estigmas de los floretes emasculadas y de la madurez de las anteras de las plantas macho. El procedimiento de polinización consistió en identificar anteras maduras de plantas macho y mediante una pinza se extrajeron las anteras y se depositaron en un frasco limpio. Posteriormente, mediante una pinza las anteras fueron trituradas y colocadas sobre los estigmas de los floretes emasculadas. Una vez completada la polinización, las panículas fueron cubiertas nuevamente con bolsas de papel encerado para evitar contaminación. A cada planta polinizada se le colocó una etiqueta con el registro de la cruza y la fecha en la que se realizó la cruza.

Finalmente, cuando las plantas alcanzaron la etapa de cosecha (Z9.0-Z9.9) se cortaron las panículas de cada cruce y se trillaron por separado de manera manual.

Evaluación de los híbridos F₁ en el ciclo verano 2023

Ubicación del área experimental

La evaluación de los híbridos F₁ se llevó a cabo durante el ciclo verano 2023 en el campo experimental Humberto Treviño Siller de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en el ejido Navidad, Galeana, Nuevo León.

Material genético

El material genético consistió en 27 híbridos F₁ productos de las cruces y los 10 genotipos comerciales como progenitores.

Preparación del terreno

Los trabajos de preparación del suelo consistieron en la realización de barbecho, rastreo, surcado y tablonero.

Diseño experimental

Los híbridos F₁ y sus progenitores fueron distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. Las parcelas experimentales consistieron de una cama de 1 m de longitud a una hilera, separadas a 0.90 m, con un área total de 0.90 m².

Modelo lineal:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + \tau_j + e_{ij}$$

Donde

Y_{ij} = valor observado de la variable en estudio para el bloque i y el tratamiento j ,
 μ = media general de la población, β_i = efecto del bloque i (con $i = 1, 2, \dots, r$, donde r es el número de repeticiones), τ_j = efecto del tratamiento j (con $j = 1, 2, \dots, p$, donde p es el número total de tratamientos), e_{ij} = error experimental asociado con la unidad experimental en el bloque i y el tratamiento j .

Siembra

La siembra se llevó a cabo el 8 de julio del 2023. Se realizó de manera manual donde se colocó 3 semillas por cada parcela experimental.

Fertilización

La cantidad de fertilizantes se determinó en función de los resultados del análisis de suelo obtenidos del laboratorio de Fertilab®. Se aplicó la dosis de 250-60-30 más 2 kg de Ultrasol® micro Rexene® BSP Mix. La fertilización se realizó antes de la siembra donde se aplicó el 50 % de N, con el 100 % de P y K. El 50 % restante del N se aplicó en la etapa de inicio de encañe. Los fertilizantes foliares Ultrasol® se aplicaron cada 15 días después de la siembra. Como fuentes de fertilizantes se utilizó Urea, MAP, Cloruro de Potasio, y Ultrasol® micro Rexene® BSP Mix.

Riegos

Se aplicaron un total de 10 riegos. Los cuales fueron aplicados en las fechas; 9 de julio, 24 de julio, 8 de agosto, 23 de agosto, 7 de septiembre, 22 de septiembre, 8 de octubre, 22 de octubre, 6 de noviembre y 22 de noviembre de 2023. Que correspondieron a las etapas fenológicas de germinación, emergencia, cuatro hojas, amacollamiento, principio de encañe, encañado, embuche, principio de espigamiento, principio de llenado de grano y final de llenado de grano, respectivamente.

Control de malezas

El control de malezas se realizó de forma manual con azadón y cuando se observó incidencia en el cultivo.

Control de plagas y enfermedades

Se observó incidencia de Diabrotica por lo que se utilizó PERMEFOS® de ingrediente activo Clorpirifos a una dosis de 0.4 L en 200 L de agua por ha⁻¹, para su control. También se observó incidencia baja de enfermedades, sin embargo, no se realizó control de enfermedades.

Variables evaluadas

Cuando los materiales llegaron a la etapa de madurez de cosecha se cortaron el total de las plantas a 2 cm sobre el nivel de suelo de cada parcela. Las muestras se secaron en el asoleadero de cereales UAAAN y cuando alcanzaron un peso constante se determinaron los componentes:

Peso seco de hojas por planta (PSH): De las muestras secadas, se separaron las hojas y se registraron los pesos en g utilizando con una balanza digital, los datos fueron ajustados a g/planta.

Peso seco de tallos por planta (PSTLL): Se determinó al separar los tallos de las muestras. Se registró su peso en g utilizando una balanza digital, los datos fueron ajustados a g/planta.

Peso seco total por planta (PSTOT): Consistió en sumar los pesos secos de hojas y tallos, registrando el valor en g por parcela, los datos fueron ajustados a g/planta.

Numero de tallos por planta (NTLL): Se contaron el número de tallos de las plantas por parcela, incluyendo aquellos que no produjeron panículas. Este valor se registró como el número de tallos/planta.

Numero de panículas por planta (NPA): Se contó el número de panículas de las plantas por parcela. Solo se consideraron aquellas que alcanzaron la madurez completa y el valor se registró en número de panículas/planta.

Longitud de panícula (LGPA): Se midieron las longitudes de tres panículas representativas de cada parcela. Desde la base hasta el ápice de cada panícula mediante una regla y se registró su valor en cm.

Numero de espiguillas por panícula (NESP): Se determinó al contar manualmente el número de espiguillas presentes de las tres panículas representativas de cada parcela, posteriormente se registró en espiguillas/panícula.

Numero de granos por panícula (NGRA): Se contaron el número de granos de las tres panículas de cada una de las parcelas, posteriormente se registró en granos/panícula.

Peso de grano por panícula (PGRA): Se trillaron tres panículas representativas de cada parcela, los granos obtenidos se pesaron y se registró el valor promedio en g/panícula.

Heterosis

La estimación de la heterosis para cada variable se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula (Kang, 2003):

$$\text{Heterosis} = \frac{F_1 - PP}{PP} \times 100$$

Donde:

- ✓ F_1 representa el rendimiento del híbrido.
- ✓ PP es el rendimiento promedio de los padres.

Heterobeltiosis

Se estimó de acuerdo con la siguiente fórmula (Kang, 2003):

$$\text{Heterobeltiosis} = \frac{F_1 - MP}{MP} \times 100$$

Donde:

- ✓ F_1 representa el rendimiento del híbrido.
- ✓ MP es el rendimiento del mejor progenitor.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba de DMS ($P \leq 0,05$) para las variables en estudio. Se utilizó el paquete estadístico de SAS versión 9.0 (SAS Institute, Cary, NC, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio 1. Evaluación agronómica de los genotipos de avena

En la localidad 1. Los resultados de los análisis de varianza mostraron diferencias ($P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$) entre los genotipos para todas las variables de RFST, PST, PSH, PSPA, RGRA, NPA, ALTP y DESP (Cuadro 3). Por otro lado, se observó diferencias ($P \leq 0.05$) entre los niveles de fertilización y bloques únicamente en la variable de RGRA. Estas diferencias son productos de la variabilidad genéticas y la capacidad de los genotipos para producir biomasa y grano, así mismo, se le atribuye a la constitución genética de cada variedad de avena. Este estudio concuerda con lo reportado por Rady (2018) en un experimento con avenas, donde se observó que las diferencias en la producción de forraje seco, relación hoja/tallo y la altura de las plantas se debían a las características genéticas particulares de cada genotipo evaluado.

Por otro lado, con relación a las pruebas de media la variable de RFST, no mostraron diferencias entre los genotipos, revelaron valores que oscilaron entre 7.37 a 9.65 t ha⁻¹. En cuanto a PST, los genotipos Gema, Cuauhtémoc, Obsidiana, Turquesa y Juchitepec presentaron los mayores valores con 4.45, 4.13, 4.03, 3.84 y 3.81 t ha⁻¹, respectivamente. En PSH destacó el genotipo Moneyda con 3.53 t ha⁻¹. Para PSPA, los genotipos Turquesa, Obsidiana, Karma y Juchitepec mostraron los valores más altos con 3.48, 3.44, 3.21 y 2.81 t ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 4).

En RGRA, sobresalieron los genotipos Obsidiana, Turquesa Karma y Cuauhtémoc con 2.27, 2.16, 1.81 y 1.46 t ha⁻¹, respectivamente. Con relación a NPA, los genotipos Obsidiana, Turquesa, Cuauhtémoc, Babícora, Bachiniva y Gema presentaron los mayores valores con 515.17, 483.33, 403.50, 379.17, 377.33 y 376.33 panículas/m², respectivamente. En ALTP, los genotipos Gema, Cuauhtémoc, Carmen y Juchitepec fueron los de mayores alturas con 145.66, 135.00, 130.00, y 125.83 cm, respectivamente. En DESP, el genotipo Moneyda fue el más tardío con 127.33 días y los genotipos Karma, Turquesa, Bachiniva y Obsidiana fueron los de mayor precocidad con 95.83, 97.66, 99.00 y 99.16 días, respectivamente (Cuadro 4).

Cuadro 3. Cuadrados medios del ANOVA para los rendimientos de forraje seco, grano y sus componentes en Buenavista, Saltillo, Coahuila. Ciclo O-I 2022-2023.

FV	GL	RFST	PST	PSH	PSPA	RGRA	NPA	ALTP	DESP
Bloques	2	1.86	0.46	0.35	0.04	0.58*	3328.21	131.71	3.21
Fertilización (F)	1	0.63	0.88	0.03	0.00	1.09*	2548.01	1.66	6.01
Error (a)	2	7.08	1.44	0.75	4.49	0.19	3721.21	63.11	4.71
Genotipos (G)	9	3.96*	1.57**	1.32**	2.11**	1.10**	23518.56**	639.63**	504.15**
GXF	9	0.41	0.22	0.12	0.35	0.13	7771.64	124.70	3.68
Error (b)	36	1.43	0.37	0.22	0.36	0.17	6114.05	135.12	5.17
C.V en %		13.53	16.78	18.85	22.78	27.50	19.65	9.35	2.19

*, ** Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuente de variación; GL = Grados de libertad; RFST= Rendimiento de forraje seco total en t ha⁻¹; PST = Peso seco de tallos en t ha⁻¹; PSH = Peso seco de las hojas en t ha⁻¹; PSPA= Peso seco de las panículas en t ha⁻¹; RGRA=Rendimiento de granos en t ha⁻¹; NPA= Número de panículas/m²; ALTP= Altura de las plantas en cm; DESP; Días a espigamiento; C.V= Coeficiente de variación en por ciento.

La variabilidad genética de cada genotipo proporciona una diversidad de genes favorables que influyen en la producción de biomasa y grano. Los resultados de este estudio difieren en la producción de forraje con relación a los reportados por Arzadun *et al.* (2013), quienes aplicaron distintos niveles de fertilización y obtuvieron rendimientos de forraje seco total entre 0.9 y 4.0 t ha⁻¹. Sin embargo, en la producción de grano, ambos estudios coinciden, con valores que varían de 1.0 a 4.0 t ha⁻¹.

La variabilidad en los rendimientos de materia seca puede atribuirse a las condiciones específicas de manejo y ambiente en cada estudio, que son factores externos que influyen en la expresión del potencial de forraje. En este estudio, la variedad Turquesa se destacó con el mejor rendimiento en materia seca total, alcanzando 9.65 t ha⁻¹. Estos resultados difieren en 2.65 t ha⁻¹ con los obtenidos por Flores-Juárez *et al.* (2019), quienes reportaron un rendimiento máximo de 12.3 t ha⁻¹ de materia seca para la variedad Turquesa bajo condiciones de fertilización.

En variables agronómicas como los DESP, son similares a los resultados de otros trabajos realizados sobre genotipos de avena, los cuales reportan valores que oscilan entre 100 a 120 días. Sin embargo, difieren en ALTP, donde se han

reportado alturas promedio de 73, 88, y 57 cm (Flores *et al.*, 2014; Gutiérrez *et al.*, 2018).

Los análisis de correlación (datos no mostrados) mostraron una relación positiva entre el NPA y RGRA ($r = 0.24$) significativo a ($P \leq 0.05$). Asimismo, se encontró una relación positiva entre el PSPA y RGRA ($r = 0.50$) a ($P \leq 0.01$). Además, el RFST mostró correlaciones positivas con el PST, PSPA, PSH, ALTP y NESP, con coeficientes de 0.88, 0.49, 0.47, 0.45 y 0.43, respectivamente, significativos a ($p \leq 0.01$). Lo que concuerda por lo reportado por Correa *et al.* (2017), quienes observaron que los genotipos con un mayor número de macollos presentaron un mayor número de tallos y panojas, lo que resultó en un aumento en la producción de grano en avena forrajera y en un considerable incremento en el peso de materia seca.

El crecimiento en altura de planta favorece inicialmente la acumulación de biomasa, aunque llega un punto a partir del cual el aumento adicional de altura no se traduce en un incremento proporcional de la materia seca. Tal como lo reportan Ferreira *et al.* (2015), que a medida que la planta alcanza los 45 cm de altura, la producción de materia seca aumenta notablemente, sin embargo, una vez superada esta altura, el rendimiento de materia seca tiende a estabilizarse de manera gradual en relación con el crecimiento en altura de la planta.

Al seleccionar genotipos de avena con alto rendimiento de grano, es fundamental considerar parámetros fisiológicos como la superficie foliar y la materia seca de hojas y tallos, como lo reportan Batalova y Lisitsyn (2021), una mayor superficie foliar está asociada con un incremento en el rendimiento de grano, reportando una correlación positiva ($r=0.80$). Sin embargo, estos hallazgos contrastan con los resultados de este estudio, donde la relación entre el RFST y RGRA ($r=0.015$) no fue significativa.

Cuadro 4. Medias para el rendimiento de forraje seco, rendimiento de grano y sus componentes en la localidad 1, Buenavista, Saltillo, Coahuila. Ciclo O-I 2022-2023.

Genotipos	RFST	PST	PSH	PSPA	RGRA	NPA	ALTP	DESP
Turquesa	9.65 ^a	3.84 ^{abc}	2.32 ^{bc}	3.48 ^a	2.16 ^{ab}	483.33 ^a	118.83 ^{bc}	97.66 ^d
Obsidiana	9.57 ^a	4.03 ^{abc}	2.09 ^{bc}	3.44 ^{ab}	2.27 ^a	515.17 ^a	116.50 ^{bc}	99.16 ^d
Gema	9.56 ^a	4.45 ^a	2.77 ^{ab}	2.33 ^{abc}	1.05 ^c	376.33 ^{abc}	145.66 ^a	109.00 ^b
Cuauhtémoc	9.24 ^a	4.13 ^{ab}	2.77 ^{ab}	2.34 ^{abc}	1.46 ^{abc}	403.50 ^{abc}	135.00 ^{ab}	104.00 ^c
Juchitepec	9.17 ^a	3.81 ^{abc}	2.54 ^{bc}	2.81 ^{abc}	1.45 ^{bc}	356.33 ^{bc}	125.83 ^{abc}	100.00 ^{cd}
Bachiniva	9.02 ^a	3.57 ^{abc}	2.69 ^{abc}	2.75 ^{abc}	1.39 ^{bc}	377.33 ^{abc}	122.33 ^{bc}	99.00 ^d
Moneyda	8.98 ^a	3.68 ^{abc}	3.53 ^a	1.77 ^c	1.22 ^c	302.00 ^c	121.33 ^{bc}	127.33 ^a
Babícora	7.93 ^a	3.21 ^{bc}	2.41 ^{bc}	2.30 ^{bc}	1.22 ^c	379.17 ^{abc}	116.00 ^{bc}	99.83 ^{cd}
Karma	7.88 ^a	2.89 ^c	1.77 ^c	3.21 ^{ab}	1.81 ^{abc}	224.50 ^{abc}	110.83 ^c	95.83 ^d
Carmen	7.37 ^a	2.94 ^{bc}	2.40 ^{bc}	2.02 ^c	1.07 ^c	361.50 ^{bc}	130.00 ^{abc}	104.00 ^c
Media	8.84	3.66	2.53	2.65	1.51	377.92	124.23	103.58
DMS	2.32	1.19	0.92	1.17	0.81	152.08	22.60	4.42

Valores con la misma letra en columna no son estadísticamente diferentes, RFST= Rendimiento de forraje seco total en t ha⁻¹; PST = Peso seco de tallos en t ha⁻¹; PSH = Peso seco de las hojas en t ha⁻¹; PSPA= Peso seco de las panículas en t ha⁻¹; RGRA=Rendimiento de granos en t ha⁻¹; NPA= Número de panículas/m²; ALTP= Altura de las plantas en cm; DESP; Días a espigamiento.

Para los niveles de fertilización, se observaron diferencias significativas únicamente en la variable RGRA ($p \leq 0.05$). Las pruebas de medias indicaron un mayor RGRA en Fert-1 que en la Fert-2 con 1.65 y 1.38 t ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 7). Estos resultados demuestran que se puede obtener mayor rendimiento de grano, si se incrementa la cantidad de fertilizante nitrogenado. Como lo reportan Pant *et al.* (2022) en su estudio sobre la evaluación de dosis de nitrógeno en diferentes variedades de avena forrajera, donde al aplicar 80, 100 y 120 kg ha⁻¹ en tres etapas del cultivo, la dosis más alta con 120 kg ha⁻¹ alcanzó 8.2 t ha⁻¹ de forraje y 2.5 t ha⁻¹ de grano.

En la localidad 2. Los resultados del análisis de varianza (Cuadro 5), mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$) entre los genotipos para las variables RFST, PST, PSH, PSPA, NPA, ALTP y DESP. Asimismo, se encontraron diferencias ($p \leq 0.01$) en las variables RFST, PST, PSH, PSPA, NPA, ALTP y en DESP a ($p \leq 0.05$) entre los niveles de fertilización.

Además, en la interacción genotipos y niveles de fertilización (GXF), se observaron diferencias en RFST, PSH y ALTP a ($p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en RGRA para ninguna fuente de variación.

Las diferencias encontradas demuestran que cada genotipo responde de manera única a los distintos niveles de fertilización, indicando que el manejo de la fertilización puede optimizarse para maximizar los rendimientos y mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes. Sin embargo, la falta de significancia en el RGRA podría atribuirse a la rusticidad de las plantas, es decir, a la capacidad de los genotipos para mantener un comportamiento similar bajo diversas condiciones ambientales, esta característica implica que, aunque la fertilización influye en el rendimiento de biomasa, el rendimiento de grano puede permanecer estable debido a propiedades genéticas inherentes a los genotipos, tal como lo señala Rípodas (2024).

Cuadro 5. Cuadrados medios del ANOVA para los rendimientos de forraje seco, grano y sus componentes en la localidad 2, Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo O-I 2022-2023.

FV	GL	RFST	PST	PSH	PSPA	RGRA	NPA	ALTP	DESP
Bloques	2	0.64	0.10	0.01	0.21**	0.00	77.01	153.11*	20.30
Fertilización (F)	1	61.89 **	9.60 **	8.74**	3.30**	0.01	77185.06**	2613.60**	52.26*
Error (a)	2	1.27	0.14	0.16	0.14	0.00	2215.71	9.05	11.66
Genotipos (G)	9	2.55 **	0.39 *	0.48**	0.45**	0.00	10231.45**	110.51**	43.97**
GXF	9	1.27 **	0.25	0.32**	0.06	0.00	4170.40	69.67*	21.60
Error (b)	36	0.55	0.15	0.07	0.03	0.00	3233.18	33.06	11.09
C.V %		20.77	27.23	22.93	20.12	129.41	28.39	7.43	2.96

*, ** Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuente de variación; GL = Grados de libertad; RFST= Rendimiento de forraje seco total en $t\ ha^{-1}$; PST = Peso seco de tallos en $t\ ha^{-1}$; PSH = Peso seco de las hojas en $t\ ha^{-1}$; PSPA= Peso seco de las panículas en $t\ ha^{-1}$; RGRA=Rendimiento de granos en $t\ ha^{-1}$; NPA= Número de panículas/ m^2 ; ALTP= Altura de las plantas en cm; DESP; Días a espigamiento; C.V= Coeficiente de variación en por ciento.

De acuerdo con la prueba de medias (Cuadro 6), los valores promedio de RFST fueron más altos en los genotipos Moneyda, Obsidiana, Karma y Juchitepec, con rendimiento de 4.71, 4.08, 4.07 y 4.05 $t\ ha^{-1}$, respectivamente. En PST, los genotipos Moneyda, Karma, Obsidiana, Juchitepec, Turquesa, Babícora,

Cuauhtémoc, y Gema presentaron los valores más altos con 1.88, 1.73, 1.60, 1.55, 1.36, 1.35, 1.32 y 1.18 ha^{-1} . En cuanto a PSH, los genotipos Moneyda, Cuauhtémoc, Juchitepec y Bachiniva se destacaron con 1.67, 1.60, 1.30 y 1.22 t ha^{-1} .

En cuanto a PSPA, los genotipos que sobresalieron fueron Obsidiana, Karma, Juchitepec y Modeyda, los cuales mostraron los valores más altos, con 1.44, 1.22, 1.20 y 1.15 t ha^{-1} . En RGRA, todos los genotipos presentaron valores similares oscilando entre 0.01 (Carmen) y 0.13 t ha^{-1} (Turquesa). De igual manera en NPA todos los genotipos presentaron valores similares oscilando entre 149.00 y 258.00 panículas/ m^2 . En la ALTP, los genotipos con mejor desempeño fueron Moneyda, Bachiniva, Cuauhtémoc, Gema y Carmen, con alturas de 82.33, 81.50, 81.16, 80.16 y 79.33 cm. En los DESP, los genotipos Moneyda, Cuauhtémoc, Babícora, Gema, Carmen y Juchitepec fueron los más tardíos, con valores de 117.00, 115.66, 114.33, 113.00, 113.00 y 112.00 días. En contraste, los genotipos Obsidiana, Karma, Turquesa y Bachiniva fueron los más precoces, alcanzando la etapa de espigamiento en 109.00, 109.33, 110.33 y 110.33 días respectivamente.

Los resultados anteriores concuerdan con estudios realizados por García *et al.* (2018), quienes reportaron alturas similares entre 67 y 62 cm en la evaluación de forraje de las variedades Turquesa y Saia, donde Turquesa mostró una altura baja que afectó considerablemente el rendimiento de materia seca, pero no al rendimiento de grano. Correa *et al.* (2017) también señalaron que los genotipos con mayor número de panojas no siempre presentan mayores rendimientos de grano, ya que el número de espiguillas, la longitud de las panojas y el tamaño de los granos también influyen en el rendimiento, lo cual coincide con los resultados obtenidos en este estudio, donde Moneyda, Juchitepec y Obsidiana mostraron una buena producción de panojas, aunque con menores rendimientos de grano en comparación con Turquesa. Otros autores como Rodríguez-Herrera *et al.* (2020) reportan una variación de 44 a 45 días para embuche y de 65 a 69 días para espigamiento donde el genotipo Turquesa en comparación con Diamante y Chihuahua resultó ser el más precoz.

Por otro lado, Flores *et al.* (2016) destacaron en su estudio que el rendimiento de materia seca depende en gran medida de la etapa fenológica en la que se realiza el corte. En su trabajo, realizaron el corte en estado lechoso masoso, concluyendo que fue en esa etapa donde el rendimiento alcanzó un valor alto de 10.7 t ha^{-1} . Por otro lado, Espitia *et al.* (2012) comparten la misma idea, ya que en esa misma etapa del cultivo el rendimiento máximo que obtuvieron fue de 19 t ha^{-1} de forraje seco. Estos resultados son muy diferentes a los obtenidos en este estudio, pero son similares a los reportados por Ramírez-Ordoñez *et al.* (2013), donde los rendimientos oscilaron entre 2.0 y 3.0 t ha^{-1} de forraje seco, con la cosecha realizada en madurez fisiológica.

El análisis de correlación (datos no mostrados) mostró que PST, PSH, PSPA, ALTP y NESP están mayormente correlacionados con RFST ($r = 0.95, 0.88, 0.83, 0.59$ y 0.57 , respectivamente). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Pérez-Amaro *et al.* (2004), quienes afirman una alta relación hoja/tallo tienden a producir mayor cantidad de forraje. De igual manera coincide con Calzada-Marín *et al.* (2014), quienes destacan que la distribución de biomasa en los diferentes componentes de la planta afecta el rendimiento total de forraje.

Cuadro 6. Medias para los rendimientos de forraje seco, grano y sus componentes en la localidad 2, Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo O-I 2022-2023.

Genotipos	RFST	PST	PSH	PSPA	RGRA	NPA	ALTP	DESP
Moneyda	4.71 ^a	1.88 ^a	1.67 ^a	1.15 ^{abc}	0.04 ^a	162.00 ^a	82.33 ^a	117.00 ^a
Obsidiana	4.08 ^{ab}	1.60 ^{ab}	1.03 ^c	1.44 ^a	0.09 ^a	237.50 ^a	72.00 ^{ab}	109.00 ^c
Karma	4.07 ^{ab}	1.73 ^{ab}	1.10 ^{bc}	1.22 ^{ab}	0.04 ^a	236.83 ^a	73.16 ^{ab}	109.33 ^{bc}
Juchitepec	4.05 ^{ab}	1.55 ^{ab}	1.30 ^{abc}	1.20 ^{ab}	0.04 ^a	243.00 ^a	78.66 ^{ab}	112.00 ^{abc}
Cuauhtémoc	3.68 ^{bc}	1.32 ^{ab}	1.60 ^{ab}	0.77 ^{de}	0.03 ^a	161.17 ^a	81.16 ^{ab}	115.66 ^{ab}
Turquesa	3.25 ^{bcd}	1.36 ^{ab}	0.82 ^c	1.06 ^{bcd}	0.13 ^a	258.00 ^a	71.00 ^b	110.33 ^{bc}
Bachiniva	3.25 ^{bcd}	1.24 ^{ab}	1.22 ^{abc}	0.78 ^{cde}	0.05 ^a	178.33 ^a	81.50 ^{ab}	110.33 ^{bc}
Babícora	3.16 ^{cd}	1.35 ^{ab}	1.11 ^{bc}	0.69 ^{de}	0.03 ^a	211.67 ^a	74.33 ^{ab}	114.33 ^{abc}
Gema	2.82 ^d	1.18 ^{ab}	0.91 ^c	0.72 ^{de}	0.03 ^a	165.17 ^a	80.16 ^{ab}	113.00 ^{abc}
Carmen	2.66 ^d	1.06 ^b	0.92 ^c	0.67 ^e	0.01 ^a	149.00 ^a	79.33 ^{ab}	113.00 ^{abc}
Media	3.57	1.43	1.17	0.97	0.05	192.53	77.36	112.40
DMS	1.44	0.75	0.52	0.38	0.13	110.59	11.18	6.47

Valores con la misma letra en columna no son estadísticamente diferentes, RFST= Rendimiento de forraje seco total en t ha⁻¹; PST = Peso seco de tallos en t ha⁻¹; PSH = Peso seco de las hojas en t ha⁻¹; PSPA= Peso seco de las panículas en t ha⁻¹; RGRA=Rendimiento de granos en t ha⁻¹; NPA= Número de panículas/m²; ALTP= Altura de las plantas en cm; DESP; Días a espigamiento.

Para los niveles de fertilización, en la Fert-3 se observaron los mayores valores en RFST, PST, PSH y PSPA, con 4.59, 1.83, 1.55 y 1.20 t ha⁻¹. De igual manera las variables NPA, ALTP y DESP destacaron con valores de 236 panículas/m², 70.76 cm y 113 días. En RGRA, se observaron rendimientos iguales entre Fert-3 y Fert-4, donde la producción fue de 0.06 y 0.03 t ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 7). Con base a lo anterior, es posible aumentar el rendimiento de forraje incrementando la dosis de fertilizante nitrogenado, como lo demuestra Puma (2022) en su estudio, que menciona que la aplicación de fertilizantes puede incrementar el rendimiento de materia seca, desde 5 a 14 t ha⁻¹, además de favorecer el crecimiento en altura de la planta. De manera similar, Pecio y Bichonski (2010), en un experimento con cinco niveles de fertilizantes en avena, observaron que la interacción entre el genotipo y la fertilización afecta de manera positiva el rendimiento, logrando un máximo de grano de 2.26 t ha⁻¹ con la dosis alta de 120 kg N ha⁻¹.

Los resultados previamente descritos en cuanto al RGRA y RFST coinciden con los reportados por Ballesteros *et al.* (2015), quienes hallaron que la aplicación de

nitrógeno en diferentes dosis, distribuidas en tres momentos a lo largo del ciclo del cultivo de avena, no generó cambios en el rendimiento de grano, pero si en la producción de forraje, resaltando que el uso de fertilizantes químicos, además de mejorar el área foliar puede fortalecer las defensas de las plantas frente a plagas y enfermedades.

Por otra parte, May *et al.* (2020) mostraron resultados donde el rendimiento de grano se puede incrementar con un máximo de 4.2 t ha⁻¹ mediante la aplicación de 90 kg/ha⁻¹ de Nitrógeno. Estos hallazgos subrayan que, en algunos lugares específicos, las dosis altas de nitrógeno de 60 a 90 kg/ha⁻¹ resultan favorables para aumentar el rendimiento.

Cuadro 7. Medias para el rendimiento de forraje seco, grano y sus componentes en las dos localidades y con dos dosis de fertilización. Ciclo O-I 2022-2023.

Localidad	Dosis de Fertilización	RFST	PST	PSH	PSPA	RGRA	NPA	ALTP	DESP
Saltillo,	Fert 1	8.94 ^a	3.77 ^a	2.51 ^a	2.65 ^a	1.65 ^a	337.60 ^a	124.06 ^a	103.26 ^a
Coahuila	Fert 2	8.73 ^a	3.53 ^a	2.55 ^a	2.64 ^a	1.38 ^b	392.90 ^a	124.40 ^a	103.90 ^a
	DMS	0.62	0.32	0.25	0.31	0.21	68.54	6.08	1.19
Galeana,	Fert 3	4.59 ^a	1.83 ^a	1.55 ^a	1.20 ^a	0.06 ^a	236.13 ^a	83.96 ^a	113.33 ^a
Nuevo	Fert 4	2.56 ^b	1.03 ^b	0.78 ^b	0.73 ^b	0.03 ^a	148.93 ^b	70.76 ^b	111.46 ^b
León	DMS	0.38	0.20	0.14	0.10	0.03	34.94	3.01	1.74

Valores con la misma letra en columna no son estadísticamente diferentes, RFST= Rendimiento de forraje seco total en t ha⁻¹; PST = Peso seco de tallos en t ha⁻¹; PSH = Peso seco de las hojas en t ha⁻¹; PSPA= Peso seco de las panículas en t ha⁻¹; RGRA=Rendimiento de granos en t ha⁻¹; NPA= Número de panículas/m²; ALTP= Altura de las plantas en cm; DESP; Días a espigamiento; Fert 1= 230-15-20; Fert 2= 11-10-25; Fert 3= 250-60-30; Fert 4= 3-10-40.

Con respecto a los resultados entre las localidades. En la localidad 1 se observaron los valores más altos de las variables que la localidad 2 (Cuadro 7). Esto puede deberse a que las características de fertilidad del suelo en Saltillo, Coahuila, fueron mejor con MO de 4.17 %, CE de 1.30 dS/m, pH de 8.54, carbonatos totales de 41.7 por lo que probablemente proporcionó una mayor disponibilidad de nutrientes, menor estrés salino y mejor aprovechamiento de nutrientes por las plantas, lo que permitió un mejor desarrollo del cultivo. A diferencia de Galeana, Nuevo León, donde el suelo presentó menor fertilidad con

MO de 2.93 %, CE de 5.44 dS/m, pH de 7.58, carbonatos totales de 73.4 por lo que la alta acumulación de calcio y carbonatos pudo haber generado una mayor compactación en el suelo, limitando la disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo y micronutrientes, y afectando el crecimiento de las raíces de las plantas (Cuadro 7).

Adicionalmente, en la localidad 1 se experimentó una granizada durante la etapa de madurez fisiológica de las plantas lo que ocasionó pérdida de grano del 40 %. Así mismo, en la localidad 2 se presentó una granizada que ocasionó una pérdida del 20 % del grano, además se presentaron heladas durante la etapa de embuche que ocasionaron quemaduras en el 30 % del área foliar que impactó negativamente en el desarrollo del cultivo y también se presentaron pérdidas del 60 % de grano en la etapa fenológica de llenado de grano por parvadas de pájaros.

Los resultados indican que las mejores características físicas y químicas del suelo en Saltillo, Coahuila, junto con una menor exposición a estrés por frío, y menos daños por pájaros favorecieron un desarrollo mejor del cultivo en RFST y RGR comparación con Galeana, Nuevo León.

Bajo este contexto, las condiciones ambientales influyen en la expresión de los genotipos para manifestar su potencial en el rendimiento de grano y forraje. Factores como la temperatura, la disponibilidad de agua, el tipo de suelo, la fertilidad del suelo y las prácticas agrícolas pueden modificar el desarrollo fenológico de los cultivos forrajeros desde su germinación y crecimiento hasta la calidad y cantidad de producción (Ferreira *et al.*, 2015). Adicionalmente, Acciaresi y Chidichimo (1999) mencionan que la diversidad ambiental permite la selección de genotipos con buenos rendimientos y adaptabilidad, de esta manera los mejores se pueden incorporar al germoplasma dentro de los programas de mejoramiento genético.

Las diferencias entre los genotipos evaluados son indicativas de la variabilidad genética, por lo tanto, afecta los rendimientos de forraje, grano y los componentes agronómicos. Con estos resultados se pueden elegir aquellos genotipos más productivos y adaptados para aumentar la producción bajo las condiciones

locales (Warchol *et al.*, 2023). Además, los mejores genotipos se pueden seleccionar como fuentes de germoplasma para desarrollar una población de amplia base genética, con el propósito de generar nuevos genotipos con mejores rendimientos, resistencia a enfermedades y adaptación a diferentes condiciones ambientales (Warchol *et al.*, 2023; Rivera *et al.*, 2018).

Estudio 2. Evaluación de los híbridos F₁

Los análisis de varianzas mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre las cruza para PSTOT, PSH, PST, NTLL, PGRA, NGRA, NPA, NESP y LGPA (Cuadro 8). Estas diferencias pueden atribuirse a la constitución genética de los híbridos que permiten la expresión de una amplia gama de características en los componentes de rendimiento tanto de forraje como de grano, como lo reporta De la Rosa *et al.* (2006). De manera similar otros autores, como Ahmad *et al.* (2014) también encontraron diferencias significativas entre las cruza en el rendimiento de forraje seco, lo que reafirma que los genotipos son genéticamente distintos, ampliando la variabilidad genética a través de la hibridación, lo cual es consistente con lo mencionado por Sánchez *et al.* (2021).

Cuadro 8. Cuadrados medios del ANOVA para las características agronómicas evaluadas de los híbridos F₁ de avena en Navidad, Galeana, Nuevo León. Verano 2023.

Variables	Fuentes de variación		Error	C.V (%)
	Bloques	Cruzas		
GL	1	36	36	
PSTOT	420.11	5371.72**	363.26	33.56
PSH	9.19	2171.67**	93.31	27.15
PST	304.54	827.66**	137.82	55.32
NTLL	11.63	167.81**	18.47	28.18
PGRA	0.59	2.49**	0.55	32.38
NGRA	1352.13	3950.91**	849.84	41.78
NPA	4.87	11.06**	2.07	18.32
NESP	38.43	84.68**	11.64	34.61
LGPA	28.95	123.08**	28.98	18.10

*, ** = Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente; GL = Grados de libertad; PSTOT= Peso seco total en g/planta; PSH= Peso seco de hojas en g/planta; PST= Peso seco de tallos en g/planta; NTLL= Número de tallos/planta; PGRA= Peso de granos g/panícula; NGRA= Número de granos/panícula; NPA= Número de panículas/planta; NESP= Número de espiguillas/panícula; LGPA= Longitud de las panículas en cm; CV= Coeficiente de variación en por ciento.

De acuerdo con la prueba de media (Cuadro 9), se observaron que para la variable PSTOT, las cruzas que mostraron los valores más altos fueron 9x1, 9x6, 1x7 y 8x2, con 202.00, 185.50, 181.00, y 129.67 g/planta. En cuanto a la variable PSH, los resultados más altos también se observaron en las cruzas 9x1, 1x7 y 9x6, alcanzando valores de 135.00, 112.00, y 101.50 g/planta. Para el PSTLL, las cruzas 9x6, 1x7, 9x1, 9x10, 8x2 y 9x11 destacaron con 84.00, 69.00, 67.00, 56.50, 38.00 y 34.92 g/planta, respectivamente. En el NTLL, el valor más alto se registró en la crusa 9x1 y 9x6 con 49.00 y 35.00 tallos/planta. Para la variable PGRA, las cruzas con los mejores valores fueron 9x11, 7x9 y 10x6, con 4.67 y 4.33 g/panícula. En el NGRA, se observó una alta cantidad de granos en las cruzas 7x9, 9x1 y 3x6, con 188.33, 173.00 y 133.00 granos/panícula. En el NESP, las cruzas que mostraron los valores más altos fueron 9x1, 7x9, 9x10, 1x11, 6x8 y 10x6, con 14.33, 12.67, 12.17, 11.33, 10.33 y 10.00 espiguillas/panícula. Respecto al NPA, la crusa 9x1 se posicionó como la mejor con 38.00

panículas/planta. Finalmente, en la LGPA se observaron los valores más altos en las cruces 8x2, 9x1, 11x7, 9x10, y 9x6 con 44.50, 43.57, 42.33, 38.55, 38.50 cm, respectivamente.

Los análisis de correlación (datos no mostrados) mostraron que el PSTOT se correlacionó ($p \leq 0.01$) con PSH, PSTLL, NTLL, LGPA, NESP y NPA con coeficientes de $r=0.97$, $r=0.94$, $r=0.89$, $r=0.55$, $r=0.45$ y $r=0.34$, respectivamente. De manera similar el PGRA se correlacionó ($p \leq 0.01$) con NGRA, NPA, LGPA y NESP, con $r=0.88$, $r=0.62$, $r=0.42$ y $r=0.41$. Estos resultados coinciden con lo reportado por Prajapati *et al.* (2009), quienes encontraron que el rendimiento de materia seca estuvo correlacionado con el número de macollos, el rendimiento de biomasa de hojas y tallos.

Cuadro 9. Prueba de medias para las características agronómicas evaluadas de los híbridos F₁ de avena en Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo Verano 2023.

Cruzas	Caracteres evaluados								
	PSTOT	PSH	PSTLL	NTLL	PGRA	NGRA	NESP	NPA	LGPA
9x1	202.00 ^a	135.00 ^a	67.00 ^{a-c}	49.00 ^a	3.00 ^{a-d}	173.00 ^{ab}	14.33 ^a	38.00 ^a	43.57 ^a
9x6	185.50 ^{ab}	101.50 ^{a-c}	84.00 ^a	35.00 ^{ab}	3.67 ^{a-d}	106.67 ^{a-d}	7.67 ^{b-f}	12.50 ^{b-d}	38.50 ^{a-c}
1x7	181.00 ^{a-c}	112.00 ^{ab}	69.00 ^{ab}	29.50 ^{bc}	3.00 ^{a-d}	99.92 ^{a-d}	8.41 ^{a-f}	11.50 ^{b-d}	30.91 ^{a-d}
8x2	129.67 ^{a-d}	91.67 ^{b-d}	38.00 ^{a-e}	22.67 ^{b-e}	1.33 ^{b-d}	46.33 ^{cd}	5.00 ^{ef}	4.00 ^{cd}	44.50 ^a
1x6	113.00 ^{b-e}	81.00 ^{b-e}	32.00 ^{b-e}	26.00 ^{b-d}	2.00 ^{a-d}	22.00 ^{cd}	6.00 ^{d-f}	2.00 ^d	28.50 ^{a-d}
9x10	106.75 ^{b-f}	50.25 ^{e-h}	56.50 ^{a-d}	17.50 ^{b-g}	3.83 ^{a-c}	115.83 ^{a-d}	12.17 ^{a-c}	11.25 ^{b-d}	38.55 ^{a-c}
7x9	103.00 ^{c-f}	69.50 ^{c-f}	33.50 ^{b-e}	18.50 ^{b-g}	4.33 ^{ab}	188.33 ^a	12.67 ^{ab}	7.50 ^{b-d}	37.90 ^{a-d}
1x11	83.00 ^{d-g}	56.00 ^{d-g}	27.00 ^{b-e}	21.00 ^{b-f}	1.00 ^{cd}	24.33 ^{cd}	11.33 ^{a-d}	10.00 ^{b-d}	37.83 ^{a-d}
9x8	69.00 ^{d-g}	45.00 ^{e-j}	24.00 ^{b-e}	23.00 ^{b-e}	3.33 ^{a-d}	94.33 ^{a-d}	6.67 ^{b-f}	13.00 ^{b-d}	30.67 ^{a-d}
8x1	67.00 ^{d-g}	46.00 ^{e-i}	21.00 ^{b-e}	14.00 ^{c-g}	1.33 ^{b-d}	44.67 ^{cd}	7.33 ^{b-f}	14.00 ^{b-d}	25.00 ^{a-d}
9x3	61.75 ^{d-g}	37.00 ^{f-k}	24.75 ^{b-e}	22.75 ^{b-e}	2.50 ^{a-d}	73.67 ^{a-d}	7.83 ^{b-f}	19.75 ^b	32.83 ^{a-d}
9x11	58.42 ^{d-g}	23.50 ^{g-k}	34.92 ^{a-e}	15.83 ^{c-g}	4.67 ^a	124.67 ^{a-d}	9.83 ^{a-e}	11.41 ^{b-d}	36.25 ^{a-d}
4x2	55.17 ^{d-g}	35.00 ^{f-k}	20.17 ^{b-e}	16.50 ^{c-g}	2.33 ^{a-d}	58.00 ^{b-d}	8.00 ^{b-f}	6.50 ^{b-d}	26.71 ^{a-d}
1x3	53.00 ^{d-g}	35.00 ^{f-k}	18.00 ^{c-e}	19.00 ^{b-g}	1.33 ^{b-d}	38.00 ^{cd}	6.67 ^{b-f}	17.50 ^{bc}	32.33 ^{a-d}
6x7	48.50 ^{e-g}	39.00 ^{f-k}	9.50 ^{de}	11.50 ^{d-g}	2.33 ^{a-d}	80.67 ^{a-d}	7.00 ^{b-f}	4.00 ^{cd}	37.67 ^{a-d}
9x4	47.84 ^{e-g}	27.83 ^{g-k}	20.00 ^{b-e}	16.66 ^{c-g}	3.33 ^{a-d}	97.50 ^{a-d}	9.00 ^{a-f}	16.66 ^{bc}	28.91 ^{a-d}
1x10	44.17 ^{e-g}	30.50 ^{f-k}	13.67 ^{de}	13.33 ^{c-g}	1.16 ^{cd}	32.67 ^{cd}	8.33 ^{a-f}	9.33 ^{b-d}	32.83 ^{a-d}
9x7	38.00 ^{e-g}	27.00 ^{g-k}	11.00 ^{de}	10.00 ^{d-g}	2.67 ^{a-d}	75.67 ^{a-d}	9.33 ^{a-f}	13.00 ^{b-d}	33.00 ^{a-d}
10x6	31.33 ^{fg}	18.67 ^{g-k}	12.67 ^{de}	10.67 ^{d-g}	4.33 ^{ab}	113.33 ^{a-d}	10.00 ^{a-f}	8.67 ^{b-d}	33.67 ^{a-d}
3x6	28.50 ^{fg}	16.00 ^{g-k}	12.50 ^{de}	12.00 ^{c-g}	3.33 ^{a-d}	133.00 ^{a-c}	9.33 ^{a-f}	9.50 ^{b-d}	34.03 ^{a-d}
7x8	27.00 ^{fg}	17.33 ^{g-k}	9.67 ^{de}	12.67 ^{c-g}	1.67 ^{a-d}	55.00 ^{b-d}	6.33 ^{c-f}	12.00 ^{b-d}	17.50 ^{cd}
11x7	20.50 ^g	15.00 ^{h-k}	5.50 ^e	6.00 ^{e-g}	2.33 ^{a-d}	48.33 ^{cd}	6.33 ^{c-f}	4.50 ^{cd}	42.33 ^{ab}
11x9	18.00 ^g	11.00 ^{h-k}	7.00 ^e	13.00 ^{c-g}	2.33 ^{a-d}	98.00 ^{a-d}	7.00 ^{b-f}	12.00 ^{b-d}	24.33 ^{a-d}
8x10	16.33 ^g	8.33 ^{ik}	8.00 ^{de}	12.00 ^{c-g}	3.33 ^{a-d}	101.67 ^{a-d}	9.00 ^{a-f}	11.00 ^{b-d}	22.73 ^{a-d}
6x8	14.50 ^g	10.00 ^{h-k}	4.50 ^e	6.50 ^{e-g}	1.33 ^{b-d}	33.00 ^{cd}	10.33 ^{a-e}	5.00 ^{cd}	34.77 ^{a-d}
6x9	8.00 ^g	5.00 ^{jk}	3.00 ^e	7.33 ^{e-g}	1.00 ^{cd}	46.33 ^{cd}	5.00 ^{ef}	7.00 ^{b-d}	15.67 ^d
11x8	5.00 ^g	3.00 ^k	2.00 ^e	4.00 ^{fg}	0.67 ^d	7.33 ^d	5.33 ^{d-f}	4.50 ^{cd}	21.00 ^{b-d}
9	84.25 ^{d-g}	41.00 ^{e-k}	43.25 ^{a-e}	16.16 ^{c-g}	2.50 ^{a-d}	58.17 ^{b-d}	7.16 ^{b-f}	12.41 ^{b-d}	30.10 ^{a-d}
1	70.00 ^{d-g}	49.50 ^{e-h}	20.50 ^{b-e}	9.50 ^{d-g}	0.66 ^d	2.67 ^d	3.66 ^f	1.00 ^d	20.91 ^{b-d}
8	45.84 ^{e-g}	30.33 ^{f-k}	15.50 ^{de}	14.66 ^{c-g}	0.83 ^{cd}	23.50 ^{cd}	6.16 ^{c-f}	7.50 ^{b-d}	31.00 ^{a-d}
3	22.67 ^g	13.00 ^{h-k}	9.67 ^{de}	16.00 ^{c-g}	2.33 ^{a-d}	80.83 ^{a-d}	9.66 ^{a-f}	12.50 ^{b-d}	19.41 ^{cd}
7	15.50 ^g	8.75 ^{i-k}	6.75 ^e	8.00 ^{e-g}	3.16 ^{a-d}	102.00 ^{a-d}	7.17 ^{b-f}	8.50 ^{b-d}	24.31 ^{a-d}
2	15.00 ^g	7.63 ^{i-k}	7.32 ^e	10.66 ^{d-g}	2.16 ^{a-d}	37.34 ^{cd}	5.83 ^{d-f}	7.83 ^{b-d}	20.16 ^{b-d}
4	12.50 ^g	7.00 ^{i-k}	5.50 ^e	7.75 ^{e-g}	2.67 ^{a-d}	67.17 ^{a-d}	8.16 ^{b-f}	8.50 ^{b-d}	18.91 ^{cd}
6	8.00 ^g	5.00 ^{jk}	3.00 ^e	8.00 ^{e-g}	1.33 ^{b-d}	27.00 ^{cd}	5.67 ^{d-f}	4.00 ^{cd}	32.33 ^{a-d}
11	6.00 ^g	3.75 ^k	2.25 ^e	4.50 ^{fg}	1.33 ^{b-d}	39.33 ^{cd}	5.33 ^{d-f}	4.50 ^{cd}	18.08 ^{cd}
10	5.50 ^g	3.00 ^k	2.50 ^e	3.00 ^g	0.83 ^{cd}	10.92 ^d	5.41 ^{d-f}	2.00 ^d	22.33 ^{a-d}
Media	56.79	35.57	21.22	15.25	2.30	69.76	7.85	9.86	29.73
DMS	79.76	40.42	49.13	17.99	3.12	122.01	6.02	14.28	22.53

Valores con la misma letra en columna no son estadísticamente diferentes, PSTOT= Peso seco total en g/planta; PSH= Peso seco de hojas en g/planta; PST= Peso seco de tallos en g/planta; NTLL= Número de tallos/planta; PGRA= Peso de granos en g/planta; NGRA= Número de granos/panícula; NPA= Número de panículas/planta; NESP= Número de espiguillas/panícula; LGPA= Longitud de las panículas en cm.

Heterosis

Para el PSTOT, las cruzas 10x6, 8x2, 1x7, 6x7, 9x6 y 4x2, mostraron los valores más altos de heterosis con 3.64, 3.26, 3.23, 3.13, 3.02 y 3.01 g/planta. En contraste, las cruzas 6x9, 11x8, 11x9 y 6x8 mostraron heterosis negativa, con valores de -0.83, -0.81, -0.60 y -0.46 g/planta. En cuanto a PSH, las cruzas 6x7, 8x2, 4x2, 10x6 y 9x6 sobresalieron con valores de heterosis de 4.67, 3.83, 3.78, 3.67, 3.41, g/planta. A diferencia de las cruzas 6x9 y 11x8 mostraron heterosis negativa con valores de -0.83 y -0.81 g/planta. Para PSTLL, los valores más altos de heterosis fueron observadas en las cruzas 1x7, 10x6, 9x6, 8x2 y 4x2 con 4.06, 3.61, 2.63, 2.33 y 2.15 g/planta. A diferencia de las cruzas 6x9 y 11x8 mostraron heterosis negativa con -0.87 y -0.77 g/planta. Para NTLL, las cruzas 9x1, 1x7 y 1x11 presentaron los valores más altos de heterosis, con valores de 2.82, 2.37 y 2.00 tallos/planta. En contraste, las cruzas 11x8, 6x8, 6x9, 9x7 y 11x7 mostraron heterosis negativa, con valores de -0.58, -0.43, -0.39, -0.17 y -0.04 tallos/planta (Cuadro 10).

En cuanto a PGRA, las cruzas 10x6, 8x10, 9x11, 9x10, 1x6 y 9x8 mostraron los valores más altos de heterosis, con 3.00, 3.00, 1.43, 1.30, 1.00 y 1.00 g/planta. En cambio, las cruzas 6x9 y 11x8 mostraron heterosis negativa, con valores de -0.48 y -0.38 g/planta. Para NGRA, las cruzas 10x6, 8x10, 9x1 y 1x10 presentaron heterosis alta, con valores de 4.98, 4.91, 4.69 y 3.81 granos/panoja. En comparación, las cruzas 11x8, 11x7, 7x8, 1x3 y 9x7 presentaron valores negativos de -0.77, -0.32, -0.12, -0.09 y -0.06 granos/panoja. Para NPA, las cruzas 9x1 y 1x11 mostraron los valores de heterosis más altos, con 1.65 y 1.52 panojas/planta, mientras que las cruzas 6x9, 8x2, 11x8, 9x3 y 7x8 que presentaron heterosis negativa con valores de -0.22, -0.17, -0.07, -0.07 y -0.05 panojas/planta. Para NESP, las cruzas 1x10, 9x1, 1x11 y 8X1 manifestaron altos valores de heterosis, con 5.22, 4.66, 2.64 y 2.29 espiguillas/panoja. Por el contrario, las cruzas 8x2, 6x7, 11x7, 7x9, 11x8, 4x2, 1x6, 6x9 y 6x8 mostraron heterosis negativa, con valores de -0.48, -0.36, -0.31, -0.28, -0.25, -0.20, -0.20, -0.15 y -0.13 espiguillas/panoja. Para LGPA, las cruzas 11x7 y 1x11, mostraron los valores más altos de heterosis, con 1.00 y 0.94 cm. No obstante, las cruzas

6x9, 7x8, 8x10, 11x8 y 8x1 presentaron heterosis negativa con valores de -0.50, -0.37, -0.15, -0.14 y -0.04 cm (Cuadro 10).

Los valores de heterosis obtenidos en este estudio fueron diferentes en cada cruza y para cada variable, esto refleja diferencias en la expresión genética y el vigor híbrido de las combinaciones. Los valores altos de heterosis pueden deberse a la genética de los progenitores, así como con la interacción entre el genotipo y el ambiente, lo que implica que cada cruza presenta un potencial único de mejora para las variables evaluadas. Como lo reportan Guzmán *et al.* (2017) y Kapoor *et al.* (2017), que la magnitud de la heterosis que se observa en un híbrido se atribuye en gran medida por la complejidad de las combinaciones genéticas y por el nivel de divergencia genética entre las variedades progenitoras que se cruzaron. Por lo tanto, en cuanto más diferentes genéticamente sean las variedades parentales mayor será la posibilidad de obtener valores altos de heterosis.

Los resultados obtenidos de heterosis en este estudio indican que se pueden mejorar los componentes de biomasa y rendimiento de grano en avena. Los valores encontrados en este ensayo son similares a los reportados por Mishra *et al.* (2014), en su investigación sobre híbridos intervarietales e interespecíficos de avena, donde obtuvieron valores de heterosis de 200 % en el NTALL por planta, 300 % en el PST por planta, 250 % en el PSH por planta y entre 200 a 250 % NPAN por planta. De manera similar Chauhan *et al.* (2018), en su estudio sobre la heterosis reportaron valores de heterosis en NTALL, que oscilaron entre el 120 % y el 180 % y en el PST se registraron valores de hasta el 250 %.

Cuadro 10. Valores de heterosis de los híbridos F₁ de avena evaluadas en Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo Verano 2023.

Cruza	Heterosis								
	PSTOT	PSH	PSTLL	NTLL	PGRA	NGRA	NPA	NESP	LGPA
10x6	3.64	3.67	3.61	0.94	3.00	4.98	0.80	1.89	0.23
11x7	0.91	1.40	0.22	-0.04	0.04	-0.32	0.01	-0.31	1.00
11x8	-0.81	-0.82	-0.77	-0.58	-0.38	-0.77	-0.07	-0.25	-0.14
11x9	-0.60	-0.51	-0.69	0.26	0.22	1.01	0.12	0.42	0.01
1x10	0.17	0.16	0.19	1.13	0.56	3.81	0.83	5.22	0.52
1x11	1.18	1.10	1.37	2.00	0.00	0.16	1.52	2.64	0.94
1x3	0.14	0.12	0.19	0.49	-0.11	-0.09	0.00	1.59	0.60
1x6	1.90	1.97	1.72	1.97	1.00	0.48	0.29	-0.20	0.07
1x7	3.23	2.85	4.06	2.37	0.57	0.91	0.55	1.42	0.37
3x6	0.86	0.78	0.97	0.00	0.82	1.47	0.22	0.15	0.32
4x2	3.01	3.78	2.15	0.79	-0.03	0.11	0.14	-0.20	0.37
6x7	3.13	4.67	0.95	0.44	0.04	0.25	0.09	-0.36	0.33
6x8	-0.46	-0.43	-0.51	-0.43	0.23	0.31	0.75	-0.13	0.10
6x9	-0.83	-0.78	-0.87	-0.39	-0.48	0.09	-0.22	-0.15	-0.50
7x8	-0.12	-0.11	-0.13	0.12	-0.17	-0.12	-0.05	0.50	-0.37
7x9	1.07	1.79	0.34	0.53	0.53	1.35	0.77	-0.28	0.39
8x1	0.16	0.15	0.17	0.16	0.78	2.41	0.49	2.29	-0.04
8x10	-0.36	-0.50	-0.11	0.36	3.00	4.91	0.55	1.32	-0.15
8x2	3.26	3.83	2.33	0.79	-0.11	0.52	-0.17	-0.48	0.74
9x1	1.62	1.98	1.10	2.82	0.89	4.69	1.65	4.66	0.71
9x10	1.38	1.28	1.47	0.83	1.30	2.35	0.93	0.56	0.47
9x11	0.29	0.05	0.53	0.53	1.43	1.56	0.57	0.35	0.50
9x3	0.16	0.37	-0.06	0.41	0.03	0.06	-0.07	0.59	0.33
9x4	-0.01	0.16	-0.18	0.39	0.29	0.56	0.17	0.59	0.18
9x6	3.02	3.41	2.63	1.90	0.91	1.50	0.19	0.52	0.23
9x7	-0.24	0.09	-0.56	-0.17	-0.06	-0.06	0.30	0.24	0.21
9x8	0.06	0.26	-0.18	0.49	1.00	1.31	0.00	0.31	0.00

PSTOT= Peso seco total en g/planta; PSH= Peso seco de hojas en g/planta; PST= Peso seco de tallos en g/planta; NTLL= Número de tallos/planta; PGRA= Peso de granos en g/planta; NGRA= Número de granos granos/panícula; NPA= Número de panículas/planta; NESP= Número de espiguillas/panícula; LGPA= Longitud de las panículas en cm.

Heterobeltiosis

En los componentes de biomasa se observaron que para PSTOT, las cruzas 10x6 y 4x2 mostraron los valores más altos con 2.94 y 2.68 g/planta, respectivamente. En PSH, las cruzas 4x2, 6x7, 10x6 y 8x2 mostraron los valores más altos con 3.59, 3.46, 2.73 y 2.02 g/planta. En PSTLL, las cruzas 10x6 y 1x7 mostraron los valores más altos con 3.22 y 2.37 g/planta. En NTLL, las cruzas 1x7 y 9x1 mostraron los valores más altos con 2.37 y 2.03 tallos/planta. Sin embargo, se observaron valores negativos en PSTOT, las cruzas 6x9 y 11x8 presentaron los valores más bajos con -0.91 y -0.89 g/planta. En PSH, las cruzas 11x8 y 6x9 presentaron los valores más bajos con -0.90 y -0.88 g/planta. En PSTLL, las cruzas 6x9 y 11x8 mostraron los valores más bajos con -0.93 y -0.87 g/planta. En NTLL, las cruzas 11x8 y 6x9 registraron los valores más bajos con -0.73 y -0.55 tallos/planta (Cuadro 11).

En los componentes de rendimiento de grano se encontraron que para PGRA, las cruzas 8x10 y 10x6 mostraron los valores más altos con 3.00 y 2.25 g/planta. Para el NGRA, las cruzas 8x10 y 10x6 mostraron los valores más altos con 3.33 y 3.20 granos/panícula. En NPA, las cruzas 9x1 y 10x6 registraron los valores más altos con 1.00 y 0.76 panículas/planta. Para el NESP, las cruzas 1x10, 9x1, 1x11 y 10x6 presentaron los valores más altos con 3.67, 2.06, 1.22 y 1.17 espiguillas/panícula. En la LGPA, las cruzas 1x11, 11x7, 1x3 y 1x10, mostraron los valores más altos con 0.81, 0.74, 0.55 y 0.47 cm. Sin embargo, también se observaron valores negativos en PGRA, las cruzas 6x9 y 11x8 presentaron los valores más bajos con -0.60 y -0.50 g/planta. En NGRA, las cruzas 11x8 y 6x9 presentaron los valores más bajos con -0.81 y -0.20 granos/panícula. En NPA, las cruzas 6x9 y 11x8 presentaron los valores más bajos con -0.30 y -0.14 panículas/planta. En NESP, las cruzas 6x9 y 11x8 presentaron los valores más bajos con -0.44 y -0.40 espiguillas/panícula. Para LGPA, las cruzas 6x9 y 11x8 mostraron los valores más bajos con -0.52 y -0.32 cm (Cuadro 11).

Cuadro 11. Valores de heterobeltiosis de los híbridos F₁ evaluadas en Navidad, Galeana, Nuevo León. Ciclo Verano 2023.

Cruza	Heterobeltiosis								
	PSTOT	PSH	PSTLL	NTLL	PGRA	NGRA	NPA	NESP	LGPA
1x3	-0.24	-0.29	-0.12	0.19	-0.43	-0.53	-0.31	0.40	0.55
1x6	0.61	0.64	0.56	1.74	0.50	-0.19	0.06	-0.50	-0.12
1x7	1.59	1.26	2.37	2.11	-0.05	-0.02	0.17	0.35	0.27
1x10	-0.37	-0.38	-0.33	0.40	0.40	1.99	0.54	3.67	0.47
1x11	0.19	0.13	0.32	1.21	-0.25	-0.38	1.13	1.22	0.81
3x6	0.26	0.23	0.29	-0.25	0.43	0.65	-0.03	-0.24	0.05
4x2	2.68	3.59	1.76	0.55	-0.13	-0.14	-0.02	-0.24	0.32
6x7	2.13	3.46	0.41	0.44	-0.26	-0.21	-0.02	-0.53	0.16
6x8	-0.68	-0.67	-0.71	-0.56	0.00	0.22	0.68	-0.33	0.08
6x9	-0.91	-0.88	-0.93	-0.55	-0.60	-0.20	-0.30	-0.44	-0.52
7x8	-0.41	-0.43	-0.38	-0.14	-0.47	-0.46	-0.12	0.41	-0.44
7x9	0.22	0.70	-0.23	0.14	0.37	0.85	0.77	-0.40	0.26
8x1	-0.04	-0.07	0.02	-0.05	0.60	0.90	0.19	0.87	-0.19
8x2	1.83	2.02	1.45	0.55	-0.38	0.24	-0.19	-0.49	0.44
8x10	-0.64	-0.73	-0.48	-0.18	3.00	3.33	0.46	0.47	-0.27
9x1	1.40	1.73	0.55	2.03	0.20	1.97	1.00	2.06	0.45
9x3	-0.27	-0.10	-0.43	0.41	0.00	-0.09	-0.19	0.58	0.09
9x4	-0.43	-0.32	-0.54	0.03	0.25	0.45	0.10	0.34	-0.04
9x6	1.20	1.48	0.94	1.16	0.47	0.83	0.07	0.01	0.19
9x7	-0.55	-0.34	-0.75	-0.38	-0.16	-0.26	0.30	0.05	0.10
9x8	-0.18	0.10	-0.45	0.42	0.33	0.62	-0.07	0.05	-0.01
9x10	0.27	0.23	0.31	0.08	0.53	0.99	0.70	-0.09	0.28
9x11	-0.31	-0.43	-0.19	-0.02	0.87	1.14	0.37	-0.08	0.20
10x6	2.92	2.73	3.22	0.33	2.25	3.20	0.76	1.17	0.04
11x7	0.32	0.71	-0.19	-0.25	-0.26	-0.53	-0.12	-0.47	0.74
11x8	-0.89	-0.90	-0.87	-0.73	-0.50	-0.81	-0.14	-0.40	-0.32
11x9	-0.79	-0.73	-0.84	-0.20	-0.07	0.68	-0.02	-0.03	-0.19

PSTOT= Peso seco total en g/planta; PSH= Peso seco de hojas en g/planta; PST= Peso seco de tallos en g/planta; NTLL= Número de tallos/planta; PGRA= Peso de granos en g/planta; NGRA= Número de granos/panícula; NPA= Número de panículas/planta; NESP= Número de espiguillas/panículas; LGPA= Longitud de las panículas en cm.

Los valores de heterobeltiosis observados en este estudio fueron diferentes para cada una de las cruzas y para cada variable evaluada, estos resultados coinciden con los trabajos realizados por Prakash *et al.* (2013), en su estudio de heterobeltiosis en avena para forraje y grano, donde señalaron que el vigor híbrido en las cruzas fue diferente en el rendimiento de grano en comparación con el de forraje y concluyeron que esta variabilidad se debe a las distintas combinaciones híbridas utilizadas en su estudio. De manera similar, otros estudios previos también han observado que existen cruzas que expresan un potencial superior al mejor progenitor, con respecto al rendimiento de forraje, al rendimiento de grano y sus componentes. Un ejemplo de ello es el trabajo de Dumlupinar *et al.* (2015), quienes documentaron la presencia del efecto de heterobeltiosis en el peso de tallos, grosor de los tallos, longitud de las panículas y en el rendimiento del forraje total. En su investigación, reportaron valores de heterobeltiosis que oscilaron entre -45.6 y 248.0 % en el rendimiento de materia seca.

De igual manera, los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los reportados por Ahmad *et al.* (2014) sobre heterobeltiosis en avena, quienes reportaron que varios híbridos superaron al mejor de sus progenitores en el rendimiento de forraje verde con valores de heterobeltiosis de 32.99 % y en rendimiento de materia seca con 29.37 %.

Con base a los valores de heterobeltiosis obtenidos de las cruzas entre los genotipos comerciales de avena en este estudio, se observa que la hibridación entre genotipos distintos, pueden generar incrementos considerables en la producción de forraje y grano. Como lo documentaron Chauhan y Singh (2019), en su investigación sobre la variabilidad y los avances genéticos en avena, donde observaron el fenómeno de heterobeltiosis en caracteres agronómicos, destacando un avance genético positivo en la cantidad de granos por espiga y el rendimiento de grano por planta, con valores de 24 % y 28.5 %, respectivamente.

CONCLUSIONES

De acuerdo con la evaluación agronómica (Estudio 1), para la localidad de Saltillo, Coahuila, los 10 genotipos evaluados pueden ser considerados para la producción de forraje. Sin embargo, para el rendimiento de grano, los genotipos Obsidiana, Turquesa, Karma, Cuauhtémoc y Moneyda por presentar buenos niveles de producción. En cuanto a la localidad de Galeana, Nuevo León, los genotipos Moneyda, Obsidiana, Karma y Juchitepec presentaron mayor potencial para el rendimiento de forraje y grano.

En cuanto a la estimación de heterosis y heterobeltiosis (Estudio 2), se encontraron valores altos tanto positivos como negativos para ambas. Las combinaciones híbridas 10x6, 8x2, 1x7, 6x7, 9x6, 4x2, 9x1 y 1x11, destacaron por sus altos valores de heterosis positiva en las variables PSTOT, PSH, NTLL y NGRA. Las cruzas 10x6, 4x2, 8x10, 6x7 y 1x7 sobresalieron con altos valores positivos de heterobeltiosis en PSTOT, PSH, NGRA, NESP y NTLL.

Estos altos valores de heterosis pueden explicarse genéticamente por la expresión de efectos no aditivos, como la dominancia y la sobredominancia, que generan ventajas en los híbridos al combinar alelos favorables provenientes de los progenitores. Además, la compatibilidad genética entre los genotipos cruzados contribuyó a maximizar la expresión de las características agronómicas, como el rendimiento y el vigor híbrido. Estas combinaciones muestran un potencial para el desarrollo de poblaciones segregantes en un programa de mejoramiento, orientado a mejorar el rendimiento y las características agronómicas del cultivo de la avena.

REFERENCIAS

- Acciaresi H. A. & Chidichimo H. O. 1999. Interacción genotipo-ambiente en avena sativa I: utilizando los modelos AMMI y factorial de correspondencias. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34 (10): 1823-1830.
- Ahmad, M., Zaffar, G., Dar Z. A., Razvi S. M., Shikari, A., Habib, M. 2014. Genetic effects of combining ability on forage quality traits and forage yield in diallel crosses of oats (*Avena sativa* L.). *Applied Biological Research*, 16 (1): 78-85.
- Arzadun, M., Laborde, H., Arroquy, J. 2013. Fertilización nitrogenada en trigo para la producción de forraje y grano en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Agriscientia*, 30 (1): 1-11.
- Badii M. H., Castillo, J., Rodríguez, M., Wong A., Villalpando, P. 2007. Diseños experimentales e Investigación Científica. *Innovaciones de Negocios*, 4 (8): 283-330.
- Batalova G. A., & Lisitsyn E. M. 2021. Análisis de correlación de los parámetros de los aparatos de asimilación de avena y elementos de productividad. *Nexo Revista Científica*, 34 (01): 379–389. <https://doi.org/10.5377/nexo.v34i01.11315>
- Ballesteros R. E., Morales R., E. J., Franco M. O., Santoyo C. E., Estrada C. G., Gutiérrez R. F. 2015. Manejo de fertilización nitrogenada sobre los componentes del rendimiento de triticale. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6 (4): 721-733.
- Berlan J. P. 2021. Hybrid corn beyond heterosis: reading George Shull's hybrid corn articles (1908–1909). *Journal of Genetics*, 100 (2): 72.
- Bouchetat, F. & Benmoussa, M. 2022. Evaluación de las capacidades de combinación y el efecto de heterosis para una mejor selección de cebada híbrida. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 13 (2): 195-206, <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2884>.
- Calzada-Marín, J. M., Enríquez-Quiroz, J. F., Hernández-Garay, A., Ortega-Jiménez, E., & Mendoza-Pedroza, S. I. 2014. Análisis de crecimiento del

- pasto maralfalfa (*Pennisetum* sp.) en clima cálido subhúmedo. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 5 (2): 247-260.
- Camarena, F., Chura J., C. R. H., Blas, R. 2014. Mejoramiento genético y biotecnológico de plantas.
- Chauhan, C., Singh S. K., Rout, S. 2018. Studies on heterosis in oat. *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, 7 (9): 272-277. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.709.034>
- Chauhan, C. & Singh, S. 2019. Genetic variability, heritability and genetic advance studies in oat (*Avena sativa* L.). *International Journal of Chemical Studies (IJCS)*, 7 (1): 992-994.
- Condón, F. & Rossi C. A. 2018. Banco de germoplasma INIA: conservando la diversidad de nuestras plantas. *Revista INIA* (52): 52-55.
- Contreras-Rojas, M., Vallejo-Cabrera, F. A., Ortiz-Grisales, S. 2023. Habilidad combinatoria de los caracteres relacionados con la producción de habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 26 (1), <https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2217>
- Correa, A., Cossoli M. R., Romero A., M. E., Barrionuevo C. M., Iglesias M. C. 2017. Utilización de bioinsumos, su relación con la micorrización espontánea en el cultivo de Avena negra (*Avena strigosa*). *Agrotecnia XI Reunión Nacional Científico-Técnica de Biología de Suelos-Corrientes* 25, (1): 2545-8906.
- De la Rosa L. A., De León C. H., Sánchez F. R., Zambrano G. M. 2006. Efectos genéticos, heterosis y diversidad genética entre híbridos comerciales de maíz adaptados al bajo mexicano. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29 (3): 247-254.
- Dietz J. I., Schierenbeck, M., Simón M. R. 2019. Impact of foliar diseases and its interaction with nitrogen fertilization and fungicides mixtures on green leaf area dynamics and yield in oat genotypes with different resistance. *Crop protection*, 121, 80-88, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.03.017>

- Dietz J. I., Schierenbeck, M. Martínez, N., Simón M. R. 2016. Aplicación de fungicidas y fertilización nitrogenada en avena: efectos sobre la generación de biomasa aérea y rendimiento. *Fave. Sección ciencias agrarias*, 15 (2): 0-0.
- Dumlupinar, Z., Karakuzulu, H., Demirtas M. B., Demirtaş, M., Uğurer, M., Gezginç, H., Akkaya, A. 2015. A heterosis study for some agronomic traits in oat. *Journal of Agricultural Sciences*, 21 (3): 414-419. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.25211>
- Espitia R. E., Villaseñor M., H. E., Huerta E. J., Salmerón Z., J. J., González I., R. M., Osorio A. L. 2007. Obsidiana, variedad de avena para la producción de grano y forraje en México. *Agricultura Técnica en México*, 33 (1):95-98.
- Espitia R. E., Villaseñor M., H. E., Tovar G., R. O., Olán, M., Limón O. A. 2012. Momento óptimo de corte para rendimiento y calidad de variedades de avena forrajera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3 (4): 771-783.
- Fehr, W. 1991. Principles of Cultivar Development: Theory and Technique. Iowa, State University.
- Ferreira, V., Grassi, E., Ferreira, A., Santo, H., Castillo, E., Paccapelo, H. 2015. Triticales y tricepiros: interacción genotipo-ambiente y estabilidad del rendimiento en grano. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 31(2): 93-104.
- Flores F. E., Moreno C. H., Figueroa V. U., Potisek T., M. C. 2014. Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de avena forrajera (*Avena sativa* L.) con aplicación de biosólidos. *Terra Latinoamericana*, 32 (2): 99-105.
- Flores-Juárez, D. J., Villegas-Aparicio, Y., Gómez-Vázquez, A., Carrillo-Rodríguez, J. C., Castañeda-Hidalgo, E. 2020. Inoculación de avena forrajera con hongos micorrízicos arbusculares. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11 (24): 191-199, <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.236>
- Flores-Juárez, D. Y., Villegas-Aparicio, Y., Castro-Rivera, R., Carrillo-Rodríguez, J. C., Castañeda-Hidalgo, E., Gómez-Vázquez, A. 2019.

- Efecto de la inoculación con hongos micorrízicos en el rendimiento de avena forrajera. *Agro Productividad*, 12(8): 23-27, <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1446>
- Flores N., M. J., Sánchez G., R. A., Echavarría C., F. G., Gutiérrez L. R., Rosales N., C. A., Salinas G. H. 2016. Producción y calidad de forraje en mezclas de veza común con cebada, avena y triticale en cuatro etapas fenológicas. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 7(3): 275-291.
- García C., Y. W., Zerón N., E. L., Cerrilla M., E. O., Ríos J. V., Villaseñor M., H. E., Garay A. H. 2018. Acumulación de forraje, composición morfológica e intercepción luminosa en dos variedades de avena. *Interciencia*, 43(9): 630-636.
- Griffing, B. 1956. Concepto de capacidad combinatoria general y específica en relación con los sistemas de cruce dialélico. *Revista australiana de ciencias biológicas*, 9(4): 463-493.
- Golden J. C. 2000. Cruce dialélico en avena para determinar el contenido de aceite y las características del grano. Tesis y disertaciones electrónicas 743: 44.
- Guerrero-Guerrero, C., Espinoza-Banda, A., Palomo-Gil, A., Gutiérrez-del Río, E., Zermeno-González, H., Castillo, G. 2011. Aptitud combinatoria del rendimiento y sus componentes en dos grupos de líneas de maíz. *Agronomía mesoamericana*, 22(2): 257-267.
- Gutiérrez, F., Loayza, C., Portilla, A., Espinosa, J. 2018. Evaluación de dosis de nitrógeno sobre la acumulación de biomasa, composición bromatológica y eficiencia de uso en avena forrajera (*Avena sativa*), variedad Dorada. *Siembra*, 5(1): 71-78. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1428>
- Guzmán, M., Díaz, D., Ramis, C., Figueroa R. R., Jiménez, R. 2017. Estimación de la aptitud combinatoria y heterosis en híbridos no convencionales de maíz con alto contenido de proteína. *Bioagro* 29(3): 175-184.

- Rodríguez-Herrera, S. A., Salgado-Ramírez, O., García-Rodríguez, J. G., Cervantes-Ortiz, F., Figueroa-Rivera, M. G., Mendoza-Elos, M. 2020. Fertilización química y orgánica en avena: rendimiento y calidad de la semilla. *Agronomía Mesoamericana*, 31(3), 564-576.
- Hernández-Campuzano, A. V., Martínez-Rueda, C. G., Estrada-Campuzano, G., Domínguez-López, A. 2018. Efecto de la fertilización nitrogenada y del genotipo sobre el rendimiento y el contenido de nitrógeno y β -glucanos en el grano de la avena (*Avena sativa* L.). *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 44(2): 88-95.
- Hernández-Pérez, M., López-Benítez, A., Borrego-Escalante, F., López-Betancourt, S. R., Ramírez-Meraz, M. 2011. Análisis dialélico del rendimiento de Chile por el Método IV de Griffing. *Agronomía Mesoamericana*, 22(1): 37-43, <https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2217>
- Huang, M., Chen, L., Chen, Z. 2015. Análisis dialélico de la capacidad combinatoria y la heterosis para el rendimiento y los componentes del rendimiento en arroz mediante el uso de loci positivos. *Euphytica*, 205: 37-50, <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1381-8>
- Juhaishi, M., Okaz, A., Hennawy, M., Zaazaa, E. 2020. Combinación de capacidad y heterosis para el rendimiento de forraje y otras características asociadas en la avena (*Avena sativa* L). *Revista de Producción Vegetal*, 11: 939-943.
- Kang M. S. 2003. Handbook of formulas and software for plant geneticists and breeders. Corn Breeding and Genetics, Department of Soil and Crop Sciences, Texas A&M University.
- Kapoor, R. & Singh, G. 2017. Estimation of heterosis and combining ability in oats (*Avena sativa* L.) for green fodder yield and attributing traits using Line \times Tester Design. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, 5(3): 863-87.0 <http://dx.doi.org/10.18782/2320-7051.2967>
- Kingston S., A. H., Marshall A. H., Moorby J. M. 2013. Breeding for genetic improvement of forage plants in relation to increasing animal production

- with reduced environmental footprint. *Animal*, 7(1): 79-88.
<https://doi.org/10.1017/S1751731112000961>
- Leyva-Mir, S. G., Villaseñor-Mir, H. E., Camacho-Tapia, M., Ávila-Quezada, G. D., García-León, E., Tovar-Pedraza, J. M. 2018. Respuesta de genotipos de avena a la infección por *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* en Valles Altos de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(2): 317-328. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1074>
- Martínez C. E., Villaseñor M., H. E., Hortelano S., R. R., Rodríguez G., M. F. 2013. Evaluación de características físicas y contenido de proteína en el grano de genotipos de avena (*Avena Sativa* L.). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria Mexicana*, 1(2): 39-45.
- May W. E., Brandt, S., Hutt T. K. 2020. Response of oat grain yield and quality to nitrogen fertilizer and fungicides. *Agronomy Journal*, 112(2): 1021-1034.
- Mishra, P., Arora R. N., Joshi U. N., Chhabra A. K. 2014. Heterosis and combining ability for quality traits in intervarietal and interspecific hybrids in oats. *Forage Research*, 40(2): 86-90.
- Pant S. R., Ghimire R. P., Prenil K. C., Upreti, S. 2022. Crecimiento y rendimiento de diferentes variedades de avena (*Avena sativa*) en el distrito de Lalitpur en Nepal. *Revista de Agricultura y Recursos Naturales*, 5(1): 34-39.
- Paudel, D., Dhungana, B., Caffè, M., Krishanan, P. 2021. Una revisión de las propiedades beneficiosas para la salud de la avena. *Foods*. 10(11): 2591. <https://doi.org/10.3390/foods10112591>
- Pecio, A. y Bichonski, A. 2010. Nitrogen fertilization and fungicide application as elements of oat production. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(6): 1297-1305.
- Pérez-Amaro, J. A., Moya G. E., Quiroz E., F. J., Carrillo Q., A. R., Pérez P. J., Hernández G. A. 2004. Análisis de crecimiento, Área foliar específica y concentración de nitrógeno en hojas de pasto "mulato" (*Brachiaria* híbrido, cv.). *Tec. Pecu. Mex.* 42: 447-458.

- Popov V. S., Khoreva A. V., Konarey A. V., Shelenga T. V., Blinova E. V., Malyshev L. L., Loskutov I. G. 2022. Evaluación del germoplasma de especies de avena cultivadas de la colección VIR en las condiciones del noroeste de Rusia. *Plants*. 11(23): 3280. <https://doi.org/10.3390/plants11233280>
- Prajapati A. S., Vishwakarma S. R., Vishwakarma D. N., Singh H. P. 2009. Expression of heterosis for forage and grain yield in oat (*Avena sativa* L.). *Range Management and Agroforestry*, 30 (1): 49-53.
- Prakash, C., Vishwakarma H. B., Ram C. N., Bharti, B. 2013. Heterosis studies for some forage and grain yield traits in oat (*Avena sativa* L.). *Plant Archives*, 13(1): 229-233.
- Puma F. D. 2022. Producción de avena forrajera (*Avena sativa* L.) con fertilización nitrogenada en el Centro Experimental-ILLPA. Tesis Lic. Puno, Perú. Universidad Nacional del Altiplano. 104.
- Rady H. Y. 2018. Efectos de la interacción genotípica y ambiental en el rendimiento de forraje y sus características relacionadas de algunos cultivos forrajeros de verano. *Journal of Plant Production*, 9(10), 815-820.
- Ramírez-Ordoñez, S., Domínguez-Díaz, D., Salmerón-Zamora, J. J., Villalobos-Villalobos, G., Ortega-Gutiérrez, J. A. 2013. Producción y calidad del forraje de variedades de avena en función del sistema de siembra y de la etapa de madurez al corte. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(4): 395-403.
- Rípodas, M. 2024. Ensayo comparativo de producción de materia verde y seca en genotipos de avena para doble propósito. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata.
- Rivera, M., Monroy, M., Sut, V., Molina, L. 2018. Respuesta de la caña de azúcar (*saccharum x officinarum*) a la regeneración de plantas a partir de callos expuestos a diez dosis de azida de sodio (NaN₃) para inducir mutaciones con fines de fitomejoramiento. Memoria presentación de resultados de investigación Zafra, 268-280.

- Salas O., L. J. 2015. La azida de sodio aplicada a las semillas de salvia (*Salvia farinacea* Benth. var. Blue Bedder) para cambios genéticos. Tesis 6-7
- Sánchez L., M. N., Villena U., W. E., Ventura A., E. E., Pedro H., J. J., Rodríguez L., L. F., Blas C., W. G., Reyes P., D. B., Varas R. J., Rosales R., S. F., Vásquez R., L. S., Salas P., F. M., Ruíz A., J. J., Yabar R., Y. I. 2021. Mejoramiento genético en plantas autógamas. *Revista de investigación científica (rebiol)*, 41(1): 136-153.
- SAS Institute. 2013. SAS/STAT® 9.0 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 5121 p.
- Sharma, G., Sood V. K., Kumar, S., Sanadya S. K., Chand, U., Kumar, N. 2024. Heterosis para características de rendimiento de semillas y forraje en avena común (*Avena sativa* L.). *Himachal Journal of Agricultural Research*, 50(1): 16-23.
- Shull G. H. 1909. Hybridization method in corn breeding. Am. Breed. Assoc. Rept. VI, 63-72.
- SIAP. 2016. Panorama agroalimentario. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>. (Fecha de consulta septiembre 2024).
- SIAP. 2023. Panorama agroalimentario. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>. (Fecha de consulta agosto 2024).
- SNICS. 2024. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). Disponible en línea: <https://www.gob.mx/snics/articulos/catalogo-nacional-de-variedades-vegetales-en-linea>. (Consulta octubre 2024).
- Sosa M. E., Mendoza P., S. I., Alejos F., J. I., Villareal G., J. A., Velasco E., D. B., Rodríguez R., E. 2020. Rendimiento de forraje de avena variedad Chihuahua. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(24): 255-264, <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2376>

- Torres M. E., Ariza S. D., Baena A., C. D., Cortes G. S., Becerra M. L., Riaño H., C. A. 2016. Efecto de la fertilización en el crecimiento y desarrollo del cultivo de la avena (*Avena sativa*). *Pastos y forrajes*, 39(2), 102-110.
- Vallejo C., F. A., y Estrada, E. I. 2002. Mejoramiento genético de plantas. Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira.
- Vargas D., R. E., Wilches O., W. A., Espitia M., E. M. 2022 Efecto del establecimiento de sistemas de rotación para el cultivo de la papa sobre las características químicas y físicas del suelo. *Siembra*, 9(2). <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.4023>
- Villaseñor M., H. E., Espitia R., E., Huerta E., J., Osorio A., L., López H., J. 2009. Turquesa, nueva variedad de avena para la producción de grano y forraje en México. *Agricultura técnica en México*, 35(4), 487-492. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i5.1872>
- Villaseñor-Mir, H. E., Huerta-Espin, J., Rodríguez-García, M. F., Santa-Rosa, R. H. Espitia-Rangel, E., Martínez-Cruz, E. 2021. Mejoramiento genético de avena En México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(25): 21-25. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2808>
- Villaseñor-Mir, H. E., Hortelano-Santa, R. R., Huerta-Espino, J., Martínez-Cruz, E., Espitia-Rangel, E., Osorio-Alcalá, L. 2023. Rubí: nueva variedad de avena para siembras de temporal en México. *Revista fitotecnia mexicana*, 46(3), 335-338. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.3.335>
- Warchol, M., Skrzypek, E., Juzoń-Sikora, K., Jakovljević, D. 2023. Avena (*Avena sativa* L.) Cultivos in vitro: perspectivas y desafíos para el mejoramiento. *Agromía*, 13(10): 2604. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102604>
- Zadoks, J., Chang, T., Konzak C. F. 1974. Un código decimal para las etapas de crecimiento de los cereales. *Weed research*, 14(6): 415-421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084>