



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA**

**CARACTERIZACIÓN GENÉTICA Y
BIOQUÍMICA DE POBLACIONES DE CHILE
GUAJILLO (*Capsicum annuum* L.) Y SUS
CRUZAS**

FANNY HERNÁNDEZ MENDOZA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe FANNY HERNÁNDEZ MENDOZA, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor DR. TARSICIO CORONA TORRES, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Caracterización genética y bioquímica de poblaciones de Chile Guajillo (Capsicum annum L.) y sus cruzas

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 18 de Julio de 2019



Firma del
Alumno (a)



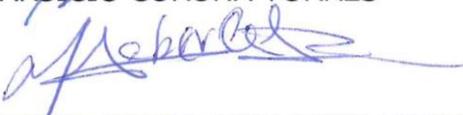
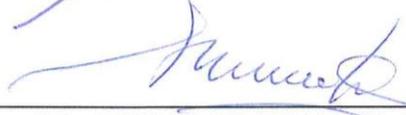
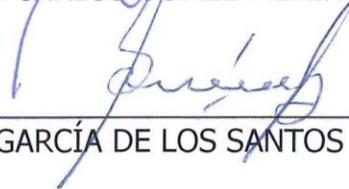
DR. TARSICIO CORONA TORRES

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Caracterización genética y bioquímica de poblaciones de Chile Guajillo (*Capsicum annuum* L.) y sus cruzas**, realizada por la alumna: **Fanny Hernández Mendoza** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO	 _____ DR. TARSICIO CORONA TORRES
ASESOR	 _____ DR. VÍCTOR HEBER AGUILAR RINCÓN
ASESOR	 _____ DR. AQUILES CARBALLO CARBALLO
ASESOR	 _____ DR. SALVADOR MIRANDA COLIN
ASESOR	 _____ DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ MERINO
ASESOR	 _____ DR. GABINO GARCÍA DE LOS SANTOS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Agosto de 2019

CARACTERIZACIÓN GENÉTICA Y BIOQUÍMICA DE POBLACIONES DE CHILE GUAJILLO (*Capsicum annuum* L.) Y SUS CRUZAS

Fanny Hernández Mendoza, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

El chile es un cultivo importante en todo el mundo por su alto valor nutricional e industrial. A fin de identificar poblaciones de esta especie, así como definir el método de mejoramiento genético a seguir en los materiales sobresalientes, se requiere información sobre diversidad en cuanto a rendimiento, calidad de fruto y semillas. El objetivo de la presente investigación fue analizar la variabilidad genética de nueve progenitores y 36 cruzas de Chile Guajillo, estimar su aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) en caracteres agronómicos, bioquímicos y calidad de semilla, y determinar la expresión heterótica en caracteres agronómicos de las cruzas. Se realizaron cruzas entre las nueve poblaciones y se obtuvieron 36 cruzas, las cuales fueron evaluadas en condiciones de campo, mediante un diseño experimental de bloques completo al azar. Posteriormente se evaluó la aptitud combinatoria general y específica en caracteres de rendimiento, fruto, planta y calidad de semillas y la heterosis en caracteres de rendimiento, fruto y planta. Por último, se realizó la medición del color del fruto y se cuantificó la concentración de capsaicinoides, flavonoides y carotenoides totales en las nueve poblaciones y sus 36 cruzas. La población que presentó la mayor ACG para caracteres de rendimiento fue la P5 al igual para carotenoides y flavonoides, lo que lo hace de gran potencial para usarse como material genético en programas de mejoramiento genético, sin embargo, la mayor pungencia se presentó en la población 2 (P2) y está fue la de mayor concentración en capsaicinoides totales. En el caso del color para la ACG solo en la variable croma se observó significancia. La ACE presentó efectos altamente significativos ($P \leq 0.001$) en sus cruzas para todas las variables de calidad de semillas, bioquímicos con excepción de croma para fruto seco y para los caracteres agromorfológicos fueron principalmente en las variables de rendimiento. En cuanto al análisis de heterosis para el rendimiento de fruto fresco las cruzas P4 x P9 y P1 x P9 la presentan con los mayores valores; mientras que el rendimiento de fruto seco mostró tanto el valor más alto de heterosis como de heterobeltiosis la cruce P1 x P9. La diversidad genética y bioquímica que se encontró en esta investigación permite identificar la variabilidad entre los materiales evaluados, misma que puede ser utilizada en programas de conservación y mejoramiento genético.

Palabras clave: Semilla, metabolitos secundarios, heterosis, aptitud combinatoria, calidad de fruto.

GENETIC AND BIOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF POPULATIONS OF CHILE GUAJILLO (*Capsicum annuum* L.) AND THEIR CROSSES

Fanny Hernández Mendoza, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

Chili is an important crop worldwide because of its high nutritional and industrial value. In order to identify populations of this species, as well as to define the method of genetic improvement to be followed in the outstanding materials, information on diversity in terms of yield, quality of fruit and seeds is required. The objective of this research was to analyze the genetic variability of nine parents and 36 crosses of Guajillo chili, estimate their general combinatorial (GCA) and specific (SCA) combinatorial ability in agronomic, biochemical and seed quality, and determine the heterotic expression in agronomic characters of those crosses. Crosses were made among the nine populations and 36 crosses were obtained, which were evaluated in field conditions, by means of a randomized complete experimental block design. Posteriormente se evaluó la capacidad de combinación general y específica de los caracteres de rendimiento, la calidad del fruto, la planta y la semilla y el carácter de heterosis de rendimiento, fruto y planta. Finally, the fruit color measurement was performed and the concentration of capsaicinoids, flavonoids and total carotenoids in the nine populations and their 36 crosses was quantified. The population that presented the highest GCA for performance characters was P5 as well as for carotenoids and flavonoids, which makes it of great potential to be used as a genetic material in genetic improvement programs, however, the greatest pungency occurred in the population 2 (P2) and this was the one with the highest concentration in total capsaicinoids. In the case of color for GCA only in the chroma variable, significance was observed. The SCA presented highly significant effects ($P \leq 0.001$) in its crosses for all seed quality variables, biochemical with the exception of chroma for dried fruit and for agromorphological characters were mainly in the yield variables. As for the analysis of heterosis for the yield of fresh fruit, the crosses P4 x P9 and P1 x P9 present it with the highest values; while the yield of dried fruit showed both the highest value of heterosis and heterobeltiosis the cross P1 x P9. The genetic and biochemical diversity that was found in this research allows us to identify the variability between the materials evaluated, which can be used in conservation and genetic improvement programs.

Keywords: Seed, secondary metabolism, heterosis, combining ability, fruit quality.

DEDICATORIA

A mis hijos **Víctor y Alberto García Hernández**, por ser mi alegría, mi inspiración, la fortaleza y mi motor para seguir adelante día a día.

A mi querido esposo **Víctor García Gaytán**, por estar a mi lado en todo momento y el apoyo brindado en la realización de esta investigación.

A mis padres **María Mendoza y Alberto Hernández**, por el apoyo incondicional, amor y consejos a lo largo de este tiempo, mil gracias.

A mis **hermanas** por apoyarme en todo momento y a mis **sobrinos** que me alegran la vida

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por la beca otorgada durante mis estudios de postgrado.

Al **Colegio de Postgraduados Campus Montecillo**, y en particular al Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, por proporcionarme la oportunidad de concluir mis estudios de doctorado, a todos los profesores que me compartieron sus conocimientos y experiencias.

A mi consejo particular: **Dr. Tarsicio Corona Torres, Dr. Víctor Heber Aguilar Rincón, Dr. Fernando Carlos Gómez Merino, Dr. Gabino García de los Santos, Dr. Aquiles Carballo Carballo y Dr. Salvador Miranda Colín**, por su apoyo y aporte durante la realización de esta investigación.

A la **Ing. Irma Sánchez Cabrera** por su amistad, apoyo y disposición incondicional para apoyarme en todo momento en la realización de esta investigación.

A los **Dres. Víctor González Hernández, Marcos Soto Hernández, M.C. Iván Ramírez, Dr. Nicacio Cruz Huerta y Dra. Mariana Palma**, por sus apoyos y facilidades brindadas en el laboratorio.

Al **M.C Moisés Ramírez Meraz** por el apoyo en la fase de campo, por lo cual fue posible concluir la presente investigación.

A mis amigos y compañeros **Dolores, Aurelio, Claudia, Cesar, Viry, Olga, Luz, Quique** por su apoyo y consejos.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURA.....	xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVOS	3
HIPÓTESIS	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Origen e importancia del cultivo	4
Diversidad del chile	6
Compuestos bioquímicos.....	7
Heterosis	8
Aptitud combinatoria.....	8
Descripción del chile Guajillo	9
Características físicas y fisiológicas de semillas	9
BIBLIOGRAFÍA	13
CAPÍTULO I. COMPONENTES GENÉTICOS DE CARACTERES RELACIONADOS CON EL RENDIMIENTO EN CHILE GUAJILLO	19
1.1 RESUMEN.....	19
1.2 ABSTRACT	20
1.3 INTRODUCCIÓN	21
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	23
1.4.1 Material vegetal	23
1.4.2. Producción de cruzas F_1	24
1.4.3 Evaluación de progenitores y cruzas F_1	24
1.4.4. Análisis estadístico	25
1.5 RESULTADOS	27
1.5.1 Análisis de varianza de progenitores y sus cruzas F_1	27

1.5.2 Comparación de medias de las cruzas y poblaciones de las variables evaluadas de chile Guajillo	28
1.5.3 Capacidad combinatoria de las poblaciones de chile Guajillo	32
1.5.4 Capacidad combinatoria específica, heterosis y heterobeltiosis en cruzas de chile Guajillo	33
1.6 DISCUSIÓN.....	37
1.7 CONCLUSIONES	40
1.8 BIBLIOGRAFÍA	41
CAPÍTULO II. EFECTOS GENÉTICOS EN LA EXPRESIÓN DE LA CALIDAD DE LA SEMILLA DE CHILE GUAJILLO	45
2.1 RESUMEN	45
2.2 ABSTRACT.....	46
2.3 INTRODUCCIÓN.....	47
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	49
2.4.1 Localización del sitio experimental.....	49
2.4.2 Material genético	49
2.4.3 Prueba de envejecimiento acelerado (PEA)	50
2.4.4 Análisis de imágenes en semillas	51
2.4.5 Análisis estadístico	51
2.5 RESULTADOS	53
2.6 DISCUSIÓN	61
2.7 CONCLUSIONES.....	63
2.8 BIBLIOGRAFÍA	64
CAPÍTULO III. PARÁMETROS GENÉTICOS DE CARACTERES FITOQUÍMICOS EN CHILE GUAJILLO (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	67
3.1 RESUMEN	67
3.2 ABSTRACT.....	68
3.3 INTRODUCCIÓN.....	69
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS	71
3.4.1 Material vegetal	71
3.4.2 Evaluación de las poblaciones y F ₁	71

3.4.3	Medición de parámetros de color	72
3.4.4	Medición de carotenoides totales	72
3.4.5	Medición de flavonoides totales	73
3.4.6	Medición de capsaicinoides	73
3.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	76
3.5.1	Comparación de medias	76
3.6	CONCLUSIONES	86
3.7	BIBLIOGRAFÍA	87
	CONCLUSIONES GENERALES	91

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO I

	Pág.
Cuadro 1. Forma de fruto y procedencia de las colectas de las nueve poblaciones de Chile Guajillo en México.	23
Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para características agronómicas y rendimiento, en poblaciones de Chile Guajillo.	27
Cuadro 3. Comparación de medias de las poblaciones y cruza de Chile Guajillo de las variables evaluadas.	29
Cuadro 4. Aptitud Combinatoria General (ACG) de nueve poblaciones de Chile Guajillo.	33
Cuadro 5. Aptitud combinatoria específica (ACE), porcentaje de heterosis (Hm) y heterobeltiosis (Hs) en las cruza de Chile Guajillo	35

CAPÍTULO II

Cuadro 1. Forma de fruto y procedencia de las colectas de las nueve poblaciones de Chile Guajillo en México.	49
Cuadro 2. Cuadrados medios para características de calidad física y fisiológica de semillas, en generaciones de Chile Guajillo.	55
Cuadro 3. Estimación de componentes de varianza genética y heredabilidad (h^2) para calidad física y fisiológica de semillas de Chile Guajillo.	55
Cuadro 4. Comparación de medias para caracteres físicos de semillas en las 9 poblaciones y seis cruza con mayor rendimiento, en dos generaciones (F_1 y F_2) de Chile Guajillo.	57
Cuadro 5. Comparación de medias para caracteres de calidad fisiológica de semillas en las 9 poblaciones y seis cruza con mayor rendimiento, en dos generaciones (F_1 y F_2) de Chile Guajillo.	58
Cuadro 6. Aptitud combinatoria general (ACG) en nueve poblaciones para variables de calidad física de semillas de Chile Guajillo.	59

Cuadro 7.	Aptitud combinatoria general (ACG) en nueve poblaciones para variables de calidad fisiológica de semillas de chile Guajillo.	59
Cuadro 8.	Aptitud combinatoria específica de 6 cruzas sobresalientes de chile Guajillo para variables de calidad fisiológica de semillas de un total de 45 cruzas F ₁ y F ₂ .	60
Cuadro 9.	Aptitud combinatoria específica de 6 cruzas sobresalientes de chile Guajillo para variables de calidad fisiológica de semillas de un total de 45 cruzas F ₁ y F ₂ .	60
CAPÍTULO III		
Cuadro 1.	Forma de fruto y procedencia de las colectas de las nueve poblaciones de chile Guajillo en México.	71
Cuadro 2.	Cuadrados medios del análisis de varianza para características fitoquímicas y color, en poblaciones de chile Guajillo.	77
Cuadro 3.	Comparación de medias para capsaicinoides, carotenoides y flavonoides en las nueve poblaciones y 11 cruzas de chile Guajillo.	79
Cuadro 4.	Comparación de medias para caracteres de color en las nueve poblaciones y 11 cruzas de chile Guajillo.	80
Cuadro 5.	Aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) en nueve poblaciones para caracteres fitoquímicos de chile Guajillo.	81
Cuadro 6.	Aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) en nueve poblaciones y sus cruzas para caracteres de color de chile Guajillo.	82

LISTA DE FIGURA

CAPÍTULO I

- Figura 1.** Forma de fruto de las colectas de las nueve poblaciones de Chile Guajillo en México a) Guajillo Rojo Guajon, b) Guajillo Rojo Intermedio y c) Guajillo Rojo Chico. **23**

INTRODUCCIÓN GENERAL

El chile (*Capsicum* spp.) es uno de los cultivos más importantes y que más se consume en todo el mundo. Su fruto contiene una gran cantidad de nutrientes, por lo que se considera un alimento importante. Se usa en forma fresca o seca, y desde hace muchos años, es un ingrediente esencial y característico en la dieta de los mexicanos. Los chiles rojos secos son ricos en vitamina A y son una fuente de β -caroteno (Shetty *et al.* 2013). En México el cultivo de chile incluye una gran cantidad de variedades de importancia alimenticia, además se reporta que es utilizado como medicamento (Guzmán *et al.*, 2011; Reeves *et al.*, 2013; Ramchiary *et al.*, 2014), por lo que actualmente se le considera un recurso genético de gran valor potencial para el mejoramiento genético. Actualmente, México ocupa el segundo lugar en producción mundial en chile fresco con 3.29 millones de toneladas cosechadas (FAO, 2019), se exporta a diferentes países como: Estados Unidos, Malasia, España y Tailandia. El chile pertenece a la familia Solanaceae, con cinco especies domesticadas (Moscone *et al.*, 2006), siendo la especie *C. annum* L. la más conocida y la de mayor importancia económica a nivel mundial (Bosland, 1994), con domesticación y diversificación en México, siendo uno de los ingredientes más importantes en la cocina mundial. México cuenta con una amplia diversidad de chiles silvestres como cultivados, los más destacados por su consumo se encuentra el tipo Anchos, Jalapeño, Serrano, Guajillo y pasilla, los cuales varían en cuanto a forma, color, sabor, tamaño y picor (Aguilar *et al.*, 2010).

Dentro de los cuatro tipos de chile más importantes en el país por su volumen de producción, está el chile tipo Guajillo cuyo cultivo se realiza bajo condiciones de riego en los estados de Zacatecas, San Luis Potosi, Durango, Michoacán, Aguascalientes y Guanajuato. Generalmente los frutos se cosechan cuando están completamente secos. Sin

embargo, cuando existe un buen precio en el mercado, la cosecha de chile maduro se realiza en fresco para luego ser secado artificialmente en deshidratadoras (Aguilar *et al.*, 2010).

El mejoramiento genético de chile en México juega un papel importante, al cruzar por vía sexual el material genómico de dos o más padres. Esto es posible mediante cruzamientos, con el propósito de combinar en la progenie los alelos no comunes en los progenitores, ampliar la variabilidad y mejorar la posibilidad de seleccionar plantas durante el proceso de selección.

Los fitomejoradores buscan mayores rendimientos y caracteres como el color del fruto, la longitud y ancho del fruto. En México, es necesario crear variedades sostenibles y competitivas, que contemple la producción de híbridos F₁, con varios propósitos comerciales y un elevado potencial de rendimiento, buena adaptación climática y aumento en su nivel nutricional.

Los bajos rendimientos del cultivo de chile Guajillo y la baja calidad de los frutos y semillas de éste, hace necesario identificar y generar materiales sobresalientes de alto rendimiento y calidad que conserven las características de color, sabor y aroma, de este tipo de chile. Con ello se pretende incrementar la disponibilidad de semilla que eleve el rendimiento y calidad de chiles en beneficio de los productores de México y la forma de lograrlo es reforzando la investigación con la finalidad de obtener variedades de chile Guajillo con las mejores características calidad y de buen rendimiento.

Con base en lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron:

OBJETIVOS

1. Analizar la variabilidad genética de las nueve poblaciones de Chile Guajillo utilizando caracteres agronómicos y bioquímicos.
2. Evaluar agronómica y bioquímica el resultado de cruces y sus poblaciones de Chile Guajillo.
3. Determinar la heterosis, aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) de las cruces de nueve poblaciones de Chile Guajillo de caracteres agronómicos.
4. Caracterizar la calidad física y fisiológica, así como la ACG, ACE de semillas obtenidas de las 36 cruces y nueve poblaciones.

HIPÓTESIS

En caracteres agronómicos, bioquímicos y de calidad de semilla de las nueve poblaciones de Chile Guajillo y sus cruces presentan variación en ACG y ACE.

REVISIÓN DE LITERATURA

Origen e importancia del cultivo

El género *Capsicum* pertenece a la familia Solanaceae, que tuvo su origen en América tropical y subtropical, cuya mayor diversidad genética se concentra en Brasil, Bolivia, Perú y México (Wang y Bosland, 2006; Djian-Caporalino *et al.*, 2006). Estudios arqueológicos sugieren el uso de este cultivo desde los años 6000 AC. (Basu y De 2003; Perry *et al.*, 2007).

Dentro del género *Capsicum* se han descrito cinco especies domesticadas: *C. annuum* L., *C. frutescens* L., *C. chinense* Jacq., *C. baccatum* L. y *C. pubescens* Ruiz y Pavon y 35 especies semidomesticadas y silvestres (Carrizo-García *et al.*, 2016).

La producción mundial del chile ha crecido considerablemente durante los últimos 20 años (FAO, 2019), de 2 a aproximadamente 4.5 millones de toneladas en chiles secos y de más de 17 a 36 millones de toneladas en chiles frescos. El área cosechada siguió una tendencia similar, con un aumento de la superficie cultivada de alrededor del 35 % en los últimos 20 años, siendo hoy alrededor de 3.8 millones de hectáreas. El chile en fresco se cultiva en 126 países en todos los continentes. El mayor productor del mundo es China con más de 18 millones de toneladas anuales, seguido de México con alrededor de 3.5 millones de toneladas (FAO, 2019). El chile en seco se cultiva en 70 países y no se reporta una producción relevante en Oceanía. India es el mayor productor con alrededor de 2.0 millones de toneladas, seguido de Tailandia (349.615 toneladas) en el año 2017.

La peculiaridad del chile es el picor debido a la presencia de capsaicinoides, que son metabolitos secundarios, derivados de fenilpropanoides producidos en células de la

epidermis placentaria, ubicadas en la superficie de la placenta (Stewart *et al.*, 2007). La sensación del picor está dada por la interacción con los receptores vanilloides, los cuales son un mecanismo de defensa contra los mamíferos. La capsaicina y la dihidrocapsaicina son los dos compuestos predominantes, que representan casi el 90 % del total de capsaicinoides. Se ha reportado que obtienen propiedades antiinflamatorias, anticancerígenas y antiobesidad, (Luo *et al.*, 2010); también son una fuente de compuestos que ejercen propiedades antioxidantes y son responsables de la pigmentación del fruto. Diferentes colores se encuentran en las frutas maduras como resultado de la acumulación de carotenoides en los cromoplastos, durante la maduración, como capsantina y capsorrubina (principalmente en frutos rojos), violaxantina y neoxantina (frutos amarillos) y luteína y β -caroteno (frutos naranja) (Gómez-García y Ochoa-Alejo, 2013).

Se han reportado altos contenidos de vitaminas esenciales, como la vitamina C y A en forma de β -caroteno y vitaminas del grupo B (tiamina, riboflavina y niacina). Todos estos compuestos, cuyo contenido está determinado por el cultivar, las condiciones ambientales y la etapa de maduración, ejercen sus efectos biológicos que protegen a las células contra el daño oxidativo a través de la interacción con las moléculas de oxígeno y los radicales de peroxilo (Padayatty *et al.*, 2002; Howard y Wildman, 2007). Finalmente, se reportan propiedades antimicrobianas y antivirulencia contra *Streptococcus pyogenes*, un patógeno humano importante (Marini *et al.*, 2015) y la infección por *Fusarium* (Tewksbury *et al.*, 2008). Estas propiedades hacen que *Capsicum* sea un buen candidato contra las enfermedades.

Diversidad del chile

En México los chiles presentan una gran diversidad en cuanto a forma, color, tamaño, sabor y picor, y se distribuyen desde el nivel del mar hasta los 2500 msnm (Hernández-Verdugo *et al.*, 1999).

La diversidad genética en chiles ha sido analizada en varios ámbitos y la caracterización morfológica se ha utilizado para analizar la diversidad fenotípica en especies de chiles domesticados y silvestres; los descriptores han permitido una discriminación fácil y rápida entre fenotipos, con caracteres altamente heredables y que pueden ser fácilmente detectados a simple vista (IPGRI *et al.*, 1995).

En el género *Capsicum* las variables del fruto son las que muestran mayor variación entre el germoplasma analizado, principalmente en diámetro, peso, longitud, ancho, forma, y espesor del pericarpio (Portis *et al.*, 2006; Bozokalfa *et al.*, 2009; Do Rêgo *et al.*, 2011). Por el contrario, las variables con menor variación son las de flores, mismas que son utilizadas en la diferenciación entre especies del género *Capsicum* (Sudré *et al.*, 2010; Ibiza *et al.*, 2011).

La diversidad también puede ser cuantificada mediante descriptores bioquímicos y organolépticos, en compuestos de bajo peso molecular (flavonoides, alcaloides, aminoácidos no proteicos y aceites esenciales), así como en compuestos volátiles, vitaminas y carotenoides (González-Andrés, 2001).

Compuestos bioquímicos

Los frutos de los chiles maduros son un buen recurso de extracción de pigmentos naturales, que se han utilizado como colorantes para la gastronomía e industria. La coloración de los chiles se debe a la presencia de compuestos carotenoides que son sintetizados durante la maduración del fruto (Hornero-Méndez *et al.*, 2002). La riqueza en pigmentos proporciona una gama de coloraciones a los frutos de los chiles, los cuales pueden ser rojos, naranja, amarillos, morados y de color café, debido a la acumulación en los cromoplastos del pericarpio (Guzmán *et al.*, 2011).

Los chiles ricos en carotenoides, además de ser una fuente de provitamina A, son también de gran interés para la extracción del pigmento rojo, y utilizados como colorante natural en las industrias cosmética, farmacéutica y gastronomía (Guzmán *et al.*, 2011).

Debido a la importancia industrial, farmacéutica y gastronómica que tienen los capsaicinoides, se han realizado diversos estudios para cuantificar el nivel de picor en diferentes tipos de chiles de especies domesticadas y silvestres, así como en variedades mejoradas (Bosland y Baral, 2007; Cisneros-Pineda *et al.*, 2007; Canto-Flick *et al.*, 2008; Bosland *et al.*, 2012; Meckelmann *et al.*, 2013). El principal uso médico de estos metabolitos es como analgésico, para disminuir dolores de cabeza, trastornos neuropáticos, cáncer, artritis, entre otros (Guzmán *et al.*, 2011).

El contenido de flavonoides en chiles también ha sido objeto de estudio. Estos compuestos aromáticos tienen capacidad antioxidante debido al número y ubicación de los grupos hidroxilo, así como presencia de dobles enlaces en su estructura (Rice-Evans *et al.*,

1996). En Chile se han identificado a quercetina y luteolina como los principales compuestos flavonoides (Howard *et al.*, 2000; Bae *et al.*, 2014).

En los últimos años se han obtenido variedades de *Capsicum annuum* con caracteres de interés agronómico y de mayor contenido de compuestos: como capsaicina, pigmentos; calidad del fruto, mayor rendimiento, además con resistencia a factores adversos bióticos y abióticos (Castañón-Nájera *et al.*, 2011; 2011b).

Heterosis

El concepto de heterosis fue acuñado por Shull (1908) para indicar la superioridad de genotipos heterocigóticos en uno o más caracteres en comparación con los progenitores correspondientes. La heterosis ha sido ampliamente utilizada en programas de mejoramiento de muchos cultivos para la identificación de poblaciones, como base para el desarrollo de líneas endogámicas a ser usadas en cruzamientos F_1 (Hallauer y Miranda, 1988).

Aptitud combinatoria

La selección de líneas con buen comportamiento para la formación de híbridos se podría lograr al evaluar las cruces de estas líneas con un probador común (Yanez Guzman *et al.*, 1993).

La aptitud combinatoria la define Rojas *et al.* (1986), como la capacidad de una línea para transmitir productividad conveniente a su progenie híbrida.

El conocimiento de la aptitud combinatoria, diversidad genética y heterosis del germoplasma en un programa de mejoramiento para desarrollar híbridos y variedades es esencial (de la Rosa *et al.*, 2000).

Con la aptitud combinatoria de los progenitores, el mejorador adquiere mayor eficiencia en su programa de mejoramiento, ya que permite seleccionar progenitores con un comportamiento promedio aceptable en una serie de cruzamientos e identificar combinaciones específicas con un comportamiento superior a lo esperado, con base en el promedio de los progenitores que intervienen en el cruzamiento (Guillen-De la Cruz *et al.*, 2009).

Descripción del chile Guajillo

Los chiles Guajillos reciben el nombre de Mirasol y Guajon. Es uno de los cuatro tipos de chile más importantes en México por su volumen de producción. Presenta frutos delgados de 2.0 a 3.5 cm de ancho y un tamaño de 9 a 14 cm. El pericarpio es delgado y al secarse se torna translucido. Su cultivo se realiza bajo condiciones de riego en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Durango, Michoacán, Aguascalientes y Guanajuato. Generalmente los frutos se cosechan cuando están completamente secos. Sin embargo, cuando existe un buen precio en el mercado, la cosecha de chile maduro se realiza en fresco para ser secado artificialmente en deshidratadoras (Aguilar *et al.*, 2010).

Se consume principalmente en seco para condimentar distintos platillos típicos en diferentes entidades del país, o molido en la preparación de dulces (Aguilar *et al.*, 2010).

Características físicas y fisiológicas de semillas

La semilla es una unidad reproductiva compleja que se forma a partir del óvulo vegetal, después de la fertilización (Doria, 2010). La capacidad de las semillas para germinar y producir una planta normal, es el principal atributo a considerar para evaluar su calidad que

comprende una serie de características que determinan su valor para la siembra; dentro de los más relevantes están pureza genética, y calidad física, fisiológica, y sanitaria (Bishaw *et al.*, 2007; Corbineau, 2012).

El desarrollo de las semillas se puede dividir en tres fases: histodiferenciación, acumulación de reservas y adquisición de tolerancia a la desecación (Taiz y Zeiger, 2010).

La germinación de una semilla se conoce biológicamente como el momento en que el embrión reactiva su crecimiento y ocurre la protrusión radicular; mientras que, en tecnología de semillas se considera que una semilla germinó hasta que ha dado origen a una plántula completa (ISTA, 2004). Los procesos fisiológicos asociados con la germinación son similares a los que suceden durante el crecimiento normal de la planta; sin embargo, los patrones de expresión de genes durante ésta son muy característicos (Ma *et al.*, 2005).

Sobre la germinación de semillas de chile inciden diversos factores, destacando la necesidad de humedad y aireación, así como un rango térmico entre 20 y 30 °C donde la germinación es más rápida a esta última, mientras que a temperaturas de 35 °C o mayores ya no hay germinación y la presencia o ausencia de luz no es un factor para la germinación (Bosland y Votava, 2000; Wall *et al.*, 2002; Nuez *et al.*, 2003).

Las semillas de chile presentan un comportamiento ortodoxo manteniéndose viables por periodos de 5 a 8 años con contenidos de humedad entre 4 y 6 % y temperatura ambiental de -10 °C. Generalmente los cultivares de *C. annuum* no presentan fenómenos acusados de latencia en las semillas (Nuez *et al.*, 2003; Bonilla *et al.*, 2004). Sin embargo, se ha observado que semillas cosechadas en estado inmaduro pueden presentar este problema. Se ha reportado la presencia de latencia en semillas de especies silvestres de *C. annuum* (Randle y Honma,

1981; Bosland y Votava, 2000), sin embargo, se recomienda extraer las semillas después de permanecer algunos días dentro del fruto para remover la latencia (Randle y Honma, 1981).

La calidad de semilla es un factor que define el éxito o la falla de un cultivo, particularmente cuando éste se enfrenta a ambientes de producción estresantes (Bewley y Black, 2000). Por lo tanto, el reto de la producción de semillas es ofrecer semillas de calidad.

Una semilla se puede ver afectada por un sin número de factores genéticos, fisiológicos y citológicos, así como patológicos y mecánicos (Bradford, 2004); de este modo, hablar de calidad de semillas implica un conjunto de atributos que contribuyen al establecimiento de la planta en campo, en donde los factores genéticos, sanitarios, físicos y fisiológicos se definen como más importantes (Hernández, 2011).

La calidad genética es importante porque a través de ésta se garantiza que la semilla genere plántulas con características deseadas. En Chile, la calidad genética garantiza el mantenimiento del rendimiento, pungencia, forma del fruto, tamaño y color (Wall *et al.*, 2002). Esta calidad se obtiene mediante el fitomejoramiento, a través de la introducción, cruzamiento y selección de material genético sobresaliente (Hernández, 2011), por lo tanto, está determinada por el genotipo de la variedad o el híbrido.

Las características de las semillas como el contenido de humedad, el peso por volumen y pureza de éstas, son considerados factores de calidad física. Adicionalmente, las características de color, tamaño, peso y daños viables por hongos e insectos son cualidades importantes para determinar este tipo de calidad (Hernandez, 2011).

La calidad de la semilla, en términos de viabilidad y vigor, se conoce como fisiológica y se establece durante el periodo de desarrollo del cultivo.

La viabilidad se refiere al porcentaje de semillas en un lote que son capaces de germinar y formar una planta normal en condiciones óptimas, pero, no es suficiente para propósitos de agricultura que una semilla complete la germinación; además, debe poseer la habilidad para germinar bajo un amplio rango de condiciones muchas veces adversas en campo, a esto se le conoce como vigor (Bradford, 2004).

El vigor de la semilla depende de la constitución genética de la planta madre y del ambiente que la rodea, semillas vigorosas producen plantas fuertes, uniformes y saludables que tienen un mejor desarrollo en su establecimiento y adicionalmente exhiben relativamente una mayor longevidad (Doijode, 2001).

La madurez fisiológica de las semillas de chile se ha asociado con la maduración del fruto (Sayed y Essam, 1952); el aspecto más visible de este proceso en la mayoría de las variedades es el cambio de color del fruto de verde a rojo o a otros colores como amarillo, chocolate-marrón o naranja (Nuez *et al.*, 2003), que generalmente ocurre 80-90 días después del transplante, dependiendo del cultivar (Salunkhe, 2003).

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Rincón V H, T T Corona, P L López, L M Latournerie, M M Ramírez, H M Villalón y J A C Aguilar (2010)** Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN, Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.
- Bae H, G K Jayaprakasha, K Crosby, K S Yoo, D I Leskovar, J Jifon, and B S Patil (2014)** Ascorbic acid, capsaicinoid, and flavonoid aglycone concentrations as a function of fruit maturity stage in greenhouse-grown peppers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33(2), 195-202.
- Basu S. K., A. K. De (2003)** Capsicum: historical and botanical perspectives. *In: De AK (ed) Capsicum: the genus Capsicum*. Taylor y Francis, London
- Bewley J D and M Black (2000)** Seed Technology and its biological basis. Sheffield Academic Press Ltd. Sheffield, England. 419 p.
- Bishaw Z, A A Niane and Y Gan (2007)** Quality seed production. Yadav, S. S. (Eds.). *In: Lentil: an ancient crop for modern times. Springer. Holanda* 349-383 pp.
- Bonilla E, C I Cardozo y M A García (2004)** Determinación de la condición fisiológica de la semilla de *Capsicum* spp. y efecto del método de secado para su almacenamiento. *Acta Agronómica (Colombia)* 53 (1/2):37-44.
- Bosland P W (1994)** Chiles: history, cultivation, and uses. *In: Spices, herbs, and edible fungi*. G Charalambous (ed). *Elsevier Publ., New York.*, pp: 347-366.
- Bosland P W and J B Baral (2007)** ‘Bhut Jolokia’—The world's hottest known chile pepper is a putative naturally occurring interspecific hybrid. *HortScience*, 42(2), 222-224.
- Bosland P W and E J Votava (2000)** Peppers: Vegetable and spice capsicums. CABI publishing. New York. 204 p.
- Bosland P W, D Coon and G Reeves (2012)** ‘Trinidad Moruga Scorpion’ Pepper is the World’s Hottest Measured Chile Pepper at More Than Two Million Scoville Heat Units. *HortTechnology*, 22(4), 534-538.
- Bozokalfa M, K Esiyok and K Turhan (2009)** Patterns of phenotypic variation in agermplasm collection of pepper (*Capsicum annuum* L.) from Turkey. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7:83-95.
- Bradford K J (2004)** Seed production and quality. *Department of Vegetable Crops. University of California. Davis, California, U.S.A.* 134 P.
- Canto-Flick A, E Balam-Uc, J J Bello-Bello, C Lecona-Guzmán, D Solís-Marroquín, S Avilés-Viñas, and L G Iglesias-Andreu (2008)** Capsaicinoids content in habanero

pepper (*Capsicum chinense* Jacq.): hottest known cultivars. *HortScience*, 43(5), 1344-1349.

Carrizo García C, M H J Barfuss, E M Sehr, G E Barboza, R Samuel, E A Moscone and F Ehrendorfer (2016) Phylogenetic relationships, diversification and expansion of chili peppers (*Capsicum*, Solanaceae). *Annals of Botany* 118:35–51

Castañón-Najera G, M Ramírez-Meraz, R Ruiz-Salazar y N M Perez (2011a). Aplicación de marcadores AFLP para explorar heterosis en *Capsicum* spp. *Phyton*, 80, 53-58.

Castañón-Najera G, R Ruiz-Salazar, N Mayek-Pérez and A C Garcia (2011b) Molecular study of a diallel chilli with amplified fragment length polymorphism (AFLP) markers. *African Journal of Agricultural Research*, 6(28), 6126-6131.

Cisneros-Pineda O, L W Torres-Tapia, L C Gutiérrez-Pacheco, F Contreras-Martín, T González-Estrada, and S R Peraza-Sánchez (2007) Capsaicinoids quantification in chili peppers cultivated in the state of Yucatan, Mexico. *Food Chemistry*, 104(4), 1755-1760.

Corbineau F (2012) Marks of seed quality: from present to future. *Seed Sci. Res.* 22:61-68

de la Rosa A, H de León, G Martínez, y F Rincón (2000) Heterosis, habilidad combinatoria y diversidad genética en híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.). *Agronomía Mesoamericana*, 11(1).

Djian-Caporalino C, V Lefebvre, A M Sage-Daubeze and A. Palloix (2006) *Capsicum*. In: Genetic Resources, Chromosome Engineering, and Crop improvement. R. J. Singh (ed.). Volume 3. Vegetable Crops. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. pp: 185-243

Doijode S D (2001) Seed Storage of Horticultural Crops. Haworth Press. New York, USA. 339 P.

Do Rêgo E R, M M do Rêgo, C D Cruz, F L Finger and V W D Casali (2011) Phenotypic diversity, correlation and importance of variables for fruit quality and yield traits in Brazilian peppers (*Capsicum baccatum*). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 58:909-918.

Doria J (2010) Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*, 31(1):74- 85.

FAO, Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura (2019) Cultivos. Mundo. Producción, cantidad. Chiles, pimientos picantes, pimientos (verdes). <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Página consultada 21/06/2018)

- Guillen-de la Cruz P, E De la Cruz-Lázaro, G Castañón-Nájera, R Osorio-Osorio, N P Brito-Manzano, A Lozano-del Río y U López-Noverola (2009)** Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 101-107.
- Gómez-García M and N Ochoa-Alejo (2013)** Biochemistry and molecular biology of carotenoid biosynthesis in chili peppers (*Capsicum* spp.). *International Journal of Molecular Sciences*, 14(9), 19025-19053.
- González-Andrés F (2001)** La caracterización vegetal: objetivos y enfoques. In: Conservación y Caracterización de Recursos Fitogénéticos. González-Andrés F. y J. M. Pita V. INEA. Valladolid España pp: 189-198.
- Guzmán I, P W Bosland and M A O'Connell (2011)** Heat, color, and flavor compounds in *Capsicum* fruit. In: The biological activity of phytochemicals, recent advances in phytochemistry 41. D R Gang (ed). *Springer Science Business Media, Inc.*, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, pp: 109-126.
- Hallauer A R and J B Miranda F (1988)** Quantitative Genetics in Maize Breeding. 2nd ed. Iowa State University Press. Ames, Iowa. pp:60-62.
- Hernández L A (2011)** Apuntes del curso de análisis de semillas. Posgrado de semillas. IREGEP. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Hernández-Verdugo S, P Dávila-Aranda y K Oyama (1999)** Síntesis del conocimiento taxonómico, origen y domesticación del género *Capsicum*. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 64:65-84.
- Hornero-Méndez D, J Costa-García and M I Mínguez-Mosquera (2002)** Characterization of carotenoid high-producing *Capsicum annuum* cultivars selected for paprika production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(20), 5711-5716.
- Howard L R and R E C Wildman (2007)** Antioxidant vitamin and phytochemical content of fresh and processed pepper fruit (*Capsicum annuum*). In: Wildman REC (ed) Handbook of nutraceuticals and functional foods. CRC Press, Boca Raton, FL, pp 165–191.
- Howard L R, S T Talcott, C H Brenes and B Villalon (2000)** Changes in phytochemical and antioxidant activity of selected pepper cultivars (*Capsicum* species) as influenced by maturity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(5), 1713-1720.
- Ibiza V P, J Blanca, J Cañizares and F Nuez (2011)** Taxonomy and genetic diversity of domesticated *Capsicum* species in the Andean region. *Genetic Resources and Crop Evolution* 59:1077-1088.

- IPGRI, A. (1995)** Descriptors for *Capsicum* (*Capsicum* spp.). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy; the Asian Vegetable Research and Development Center, Taipei, Taiwan, and the Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. *Turrialba, Costa Rica*, 110.
- ISTA (International Seed Testing Association) (2004)** International rules for seed testing. Bassersdorf, CH-Switzerland.
- Luo X-J, Peng J and Li Y-J (2010)** Recent advances in the study of capsaicinoids and capsinoids. *European Journal of Pharmacology*, 650 (1), 1-7.
- Ma L, N Sun, X Liu, Y Jiao, H Zhao and X W Deng (2005)** Organ-specific expression of *Arabidopsis* genome during development. *Plant Physiology* 138:80-91.
- Marini E, G Magi, M Mingoia, A Pugnali y B Facinelli (2015)** Antimicrobial and antivirulence activity of capsaicin against erythromycin-resistant, cell-invasive group A streptococci. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1281.
- Meckelmann S W, D W Riegel, M J Van Zonneveld, L Ríos, K Peña, R Ugas and M Petz (2013)** Compositional characterization of native Peruvian chili peppers (*Capsicum* spp.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(10), 2530-2537.
- Moscone E A, M A Scaldaferrro, M Grabile, N M Cecchini, Y Sánchez García, R Jarret, J R Daviña, D A Ducasse, G E Barboza and F Ehrendorfer (2006)** The evolution of chili peppers (*Capsicum*-Solanaceae): A cytogenetic perspective. In: VI International Solanaceae Conference: *Genomics Meets Biodiversity* 745. pp: 137-170.
- Nuez F, R Gil Ortega y J Costa (2003)** El cultivo de pimientos, chiles y ajíes. Ediciones Mundi-Prensa Madrid-España. 586 p.
- Padayatty S J, A Katz., Y Wang, P Eck, O Kwon, J H Lee, S Chen, C Corpe, A Dutta, S Dutta, M D Facn and M Levine (2002).** Vitamin C as an antioxidant: evaluation of its role in disease prevention. *Journal of the American college of Nutrition*, 22(1), 18-35.
- Perry L, Dickau R, Zarrillo S, Hoist I, Pearsall DM, Piperno DR, Berman MJ, Cooke RG, Rademaker K, Ranere A, Raymond S, Sandweiss DH, Scaramelli F, Tarble K and Zeidler JA (2007)** Starch fossils and the domestication and dispersal of chili peppers (*Capsicum* spp. L.) in the Americas. *Science* 315, 986–988.
- Portis E, G Nervo, F Cavallanti, L Barchi and S Lanteri (2006)** Multivariate analysis of genetic relationships between Italian pepper landraces. *Crop Science* 46:2517-2525.
- Ramchiary N, M Kehie, V Brahma, S Kumaria and P Tandon (2014)** Application of genetics and genomics towards *Capsicum* translational research. *Plant Biotechnology Reports*, 8(2), 101-123.

- Randle W M and S Honma (1981)** Dormancy in peppers. *Scientia Horticulturae* 14:19-25.
- Reeves G, A Monroy-Barbosa and P W Bosland (2013)** A novel *Capsicum* gene inhibits host-specific disease resistance to *Phytophthora capsici*. *Phytopathology* 103:472-478.
- Rice-Evans C A, N J Miller and G Paganga (1996)** Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. *Free radical biology and medicine*, 20:7 933-956.
- Rojas Soriano R (1986)** *Métodos para la investigación social: una proposición dialéctica* (No. 300.72 R6).
- Salunkhe D K (2003)** Tratado de Ciencia y Tecnología de las Hortalizas: Producción, Composición, Almacenamiento y Procesado. Editorial ACRIBIA S. A. Zaragoza, España. 739 p.
- Sayed M S and M Essam (1952)** Viability of seeds harvested from fruits at different stages of maturity. *Proceedings of American Society for Horticultural Science* 60:327-329.
- Shetty A A, S Magadam and K Managanvi (2013)** Vegetables as sources of antioxidants. *Journal of Food and Nutritional Disorders*, 2(1):1-5
- Shull G H (1991)** Experiments with maize. *Bot Gaz* 52:480-483.
- Stewart C Jr, M Mazourek, G M Stellari, M O'Connell and M Jahn (2007)** Genetic control of pungency in *C. chinense* via the Pun1 locus. *Journal of Experimental Botany*, 58(5), 979-991
- Sudré C P, L S A Gonçalves, R Rodrigues, A D Amaral Júnior, Riva-Souza E M and C D S Bento (2010)** Genetic variability in domesticated *Capsicum* spp. as assessed by morphological and agronomic data in mixed statistical analysis. *Genetics and Molecular Research*, 9(1), 283-294.
- Taiz L and E Zeiger (2010)** Plant Physiology. 5th ed. Sinauer Associates, Inc. Publishers. Sunderland, Massachusetts, USA. 764 p.
- Tewksbury J J, K M Reagan, N J Machnicki, T A Carlo, D C Haak, A L C Peñaloza and D J Levey (2008)** Evolutionary ecology of pungency in wild chilies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(33), 11808-11811.
- Wall A D, R Kochevar and R Phillips (2002)** Chile seed quality. New Mexico chile task force. Report 4. *New Mexico State University and US Department of Agriculture*. 6 p.
- Wang D and P W Bosland (2006)** The genes of *Capsicum*. *HortScience* 41(5):1169-1187.

Yanez Guzmán C F, C G Molina, A C Mejia y A Arrieta (1993) La aptitud combinatoria general de líneas de maíz (*Zea mays* L.) en la explicación de heterosis. Colegio de Postgraduados, Montecillo. Tesis de Maestria

CAPÍTULO I. COMPONENTES GENÉTICOS DE CARACTERES RELACIONADOS CON EL RENDIMIENTO EN CHILE GUAJILLO

Fanny Hernández Mendoza¹, Tarsicio Corona Torres^{1*}, Víctor Heber Aguilar Rincón¹, Fernando Gómez Merino², Aquiles Carballo Carballo¹, Gabino García de los Santos¹, Salvador Miranda Colín¹ e Irma Sánchez Cabrera¹.

1.1 RESUMEN

El género *Capsicum* comprende uno de los grupos de plantas de mayor importancia económica y gastronómica del mundo. Si bien su centro de origen se ubica en las regiones andinas de Brasil, Bolivia y Perú, su domesticación, para una de las cinco especies, *C. annuum*, ocurrió en México. A esta especie pertenece el chile Guajillo, cuyo uso principal es en seco. En este tipo de chile poco se conoce sobre sus parámetros genéticos. El objetivo fue identificar poblaciones con mejores características de planta y alto rendimiento con el propósito de obtener información de sus patrones heteróticos. Para este estudio se utilizaron nueve poblaciones de chile Guajillo de diferentes entidades de México, las cuales mediante un diseño dialélico parcial, originaron 36 cruzas. La evaluación de las cruzas y sus poblaciones se llevó a cabo en el Campo Experimental las Huastecas de Tamaulipas, México. Los análisis de varianza mostraron efectos altamente significativos ($P \leq 0.001$) en la aptitud combinatoria general (ACG) en los progenitores, así como para la aptitud combinatoria específica (ACE) en sus cruzas principalmente en las variables de rendimiento. En la variable número de frutos por planta (NFP) se observó una mayor ACG, así como en la craza P1 x P9 que mostró mayor valor de heterosis y heterobeltiosis. La variable longitud de fruto (LF) mostró valores altos de heterosis en cuatro cruzas y solo tres de éstas mostraron heterobeltiosis. El rendimiento de fruto fresco (RFF), el valor heterótico positivo, se observó en las cruzas P2 x P5, P3 x P4, P3 x P5, P4 x P9 y P7 x P9; mientras que el rendimiento de fruto seco (RFS) mostró el valor heterótico y de heterobeltiosis positivos y altamente significativos, en las cruzas P1 x P9 y P2 x P6; mientras que la craza P3 x P9 solo muestra un valor significativo positivo de heterosis.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, aptitud combinatoria general; heterosis; heterobeltiosis; híbridos; poblaciones.

GENETIC COMPONENTS OF CHARACTERS RELATED TO PERFORMANCE IN PEPPER GUAJILLO

1.2 ABSTRACT

The *Capsium* genus comprises one of the most economically important and gastronomic plant groups in the world. Although its center of origin is located in the Andean regions of Brazil, Bolivia and Peru, its domestication, for one of the five species, *C. annum*, occurred in Mexico. Guajillo chili belongs to this species; whose main use is dry. In this type of chili, little is known about its genetic parameters. The objective was to identify populations with better plant characteristics and high yield in order to obtain information on his heterotic patterns. For this study, nine populations of Guajillo chile from different entities of Mexico were used, which by means of a partial dialectic design, originated 36 crosses. The evaluation of the crosses and their parents was carried out in the Experimental Field of Las Huastecas de Tamaulipas, Mexico. The analysis of variance showed highly significant effects ($P \leq 0.001$) in the general combining ability (GCA) in the parents, as well as for the specific combining ability (SCA) in their crosses mainly in the performance variables. In the variable number of fruit per plant (NFP), a higher GCA was observed, as well as in the cross P1 x P9 that showed higher value of heterosis and heterobeltiosis. The variable fruit length showed high values of heterosis in four crosses and only three of these showed heterobeltiosis. The fresh fruit yield, the positive heterotic value, was observed in the crosses P2 x P5, P3 x P4, P3 x P5, P4 x P9 and P7 x P9; while the yield of dried fruit showed the positive and highly significant heterotic and heterobeltiosis value, at the P1 x P9 and P2 x P6 crosses; while the cross P3 x P9 only shows a significant positive value of heterosis.

Keywords: *Capsicum annum*, general combining ability; heterosis; heterobeltiosis; hybrids; populations.

1.3 INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum annuum* L.) es una de las cinco especies domesticadas y más cultivadas por su importancia económico, medicinal y nutricional. Actualmente China, México, Turquía, Indonesia y España son los cinco principales productores de chile fresco, en tanto, que La India, China, Pakistán, Tailandia y Perú son los productores de chile seco (Bravo *et al.*, 2006). La producción de chiles secos tiene gran importancia en México, y el chile Guajillo es uno de ellos, usado principalmente en la elaboración de pastas para moles que se incorporan en diferentes platillos regionales. En México en el año 2017 se sembraron alrededor de 9 mil ha de chile Guajillo, con un rendimiento promedio de 1.46 t ha⁻¹ (SAGARPA-SIAP, 2017). Los estados donde más se cultiva este tipo de chile son Zacatecas y Durango y, en menor escala es San Luis Potosí, Chihuahua, Aguascalientes y Jalisco (Bravo *et al.*, 2006; Moreno-Pérez *et al.*, 2011).

Para incrementar la producción de este tipo de chile se requiere contar con semillas mejoradas que ayuden a obtener mayor rendimiento, calidad y sanidad, que actualmente no se tienen ya que la mayoría de los productores utilizan semilla criolla, obteniéndose bajos rendimientos. Para ello se requiere conocer la variabilidad y evaluar las cualidades de un conjunto de progenitores que permitan identificar a los mejores parentales que presenten una alta capacidad combinatoria. Para el conocimiento de esa variabilidad se requieren métodos que permitan cuantificarla y uno de esos métodos son los diseños dialélicos propuestos por Griffing (Griffing, 1956), que facilita la identificación de las combinaciones y los individuos superiores, los cuales proporcionan información sobre la heterosis y la heterobeltiosis que son fenómenos biológicos que más interés han despertado en la investigación debido a su importancia en el mejoramiento de plantas, puesto que es el resultado del cruzamiento de

progenitores divergentes que dan oportunidad de obtener híbridos superiores al promedio de ambos o al mejor progenitor (Esquivel *et al.*, 2011; Vaishnav *et al.*, 2009).

El valor de un genotipo depende de su potencial *per se* y de su capacidad de combinarse; la evaluación de germoplasmas es un aspecto decisivo en programas de mejoramiento genético (de la Cruz-Lázaro *et al.*, 2010). Aspectos particulares como la productividad, la resistencia, tolerancia a estrés biótico y abiótico, arquitectura, precocidad y calidad de frutos son objetivos fundamentales de estudio en el mejoramiento del género *Capsicum* (Do Rêgo *et al.*, 2011). Así mismo, el estudio de la diversidad genética del género *Capsicum* proporciona parámetros para la identificación de progenitores que producen mayores efectos heteróticos y la probabilidad de obtener genotipos superiores en las siguientes generaciones (Sudré *et al.*, 2005; Costa *et al.*, 2016). El objetivo de esta investigación fue identificar mejores parentales generales y específicos en rendimiento *per se*, y las combinaciones de cruzas heteróticas para el rendimiento y características de calidad del fruto del chile guajillo en México.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Material vegetal

Las poblaciones utilizadas como los progenitores se formaron, con base a las características de tamaño, forma y color de fruto provenientes de los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosi y Guanajuato, México (Figura 1, Cuadro 1). Se formó un dialélico parcial con nueve progenitores (poblaciones) con un total de 36 cruzas.

Cuadro 1. Forma de fruto y procedencia de las colectas de las nueve poblaciones de chile Guajillo en México.

Población	Descripción	Origen
P1	Guajillo Rojo Guajón	Dgo. Zac. y Villa de Reyes SLP
P2	Guajillo Rojo Intermedio	Dgo. Zac. y Villa de Reyes SLP
P3	Guajillo Rojo Chico	Dgo. Zac. y Villa de Reyes SLP
P4	Guajillo Rojo Guajón	San Luis Potosí
P5	Guajillo Rojo Intermedio	San Luis Potosí
P6	Guajillo Rojo Chico	San Luis Potosí
P7	Guajillo Rojo Guajón	Guanajuato
P8	Guajillo Rojo Intermedio	Guanajuato
P9	Guajillo Rojo Chico	Guanajuato



Figura 1. Forma de fruto de las colectas de las nueve poblaciones de chile Guajillo en México
a) Guajillo Rojo Guajon, b) Guajillo Rojo Intermedio y c) Guajillo Rojo Chico.

1.4.2. Producción de cruzas F₁

Para la germinación de la semilla, de las nueve poblaciones de chile guajillo, se utilizaron 100 semillas de cada población las cuales se colocaron en charolas de poliestireno con 200 cavidades, y como sustrato tierra de monte, posteriormente las charolas se estibarón y fueron cubiertas con plástico negro hasta su germinación. El experimento se realizó en el año 2015 en un invernadero de metal con cubierta plástico en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México, ubicada a 19 ° 20' N, 53' W, a una altitud de 2250 m. Las plántulas fueron trasplantadas 60 días después de la germinación en bolsas de polietileno de color blanco con dimensiones de 40 x 40 cm con capacidad para 12 L, se usó tezontle rojo como sustrato con granulometría 7 mm. El sistema de riego fue por goteo, se aplicó la solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1966), con las siguientes concentraciones en mol_c m⁻³ 12.0 NO₃⁻, 1.0 H₂PO₄⁻¹, 7.0 SO₄²⁻, 7.0 K⁺, 9 Ca²⁺, y 4.0 Mg²⁺; las concentraciones fueron modificadas en función con la etapa fenológica. Se estableció un diseño completo al azar con tres repeticiones. Una vez iniciada la floración se procedió a realizar las cruzas y las autofecundaciones para obtener la generación F₁. De las nueve poblaciones se formó un dialélico parcial con las autofecundaciones y cruzas simples: 1x1, 2x3, 3x4...9x9, con un total de 36 cruzas y los nueve progenitores.

1.4.3 Evaluación de progenitores y cruzas F₁

Posteriormente la evaluación de los híbridos y sus progenitores, se llevó a cabo en 2017, en el Campo Experimental La Huasteca del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado al sur de Tamaulipas, México. El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, la unidad experimental estuvo representada por una parcela útil de 1.84 m² (dos surcos de 2

m de longitud por 0.92 cm de ancho). Los caracteres evaluados, de acuerdo al manual de descriptores para *Capsicum* (IPGRI *et al.*, 1995) fueron: altura de planta (AP), la cobertura del dosel (CD) (cm), altura de la primera bifurcación (APB) (cm); peso por fruto fresco (PFF) (g), peso por frutos secos (PFS) (g) para estos dos caracteres se tomó el peso promedio de 12 frutos, longitud de frutos (LF) (cm), ancho de frutos (AF) (cm), longitud del pedúnculo (LP) (cm) y número de frutos por planta (NFP); rendimiento de fruto seco (RFS, t h⁻¹) y rendimiento de fruto fresco (RFF, t h⁻¹). La evaluación de las variables de planta se realizó en cuatro plantas en cada unidad experimental y la de los frutos en tres frutos por planta. La evaluación de las variables de rendimiento en verde y seco se realizó considerando todas las plantas de la unidad experimental de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$t \text{ ha}^{-1} = [10,000 \text{ m}^2/\text{parcela útil (1.84 m}^2)] * \text{rendimiento de la parcela}$$

1.4.4. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de los datos experimentales y las medias fueron comparadas por la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), con el paquete estadístico SAS ver. 9.3. La heterosis porcentual (Hm) se estimó respecto al promedio de cada una de las variables agronómicas y de rendimiento mediante la fórmula $H = (F_1 - PM) / PM \times 100$ y la heterobeltiosis (Hs) se estimó con la fórmula $HB = (F_1 - BP) / BP \times 100$. Dónde F_1 : media fenotípica de la población F_1 ; PM : $[(P_1 + P_2) / 2]$, media fenotípica del progenitor; BP = media del mejor progenitor que interviene en la cruce (P_1 o P_2). Mediante la prueba de “t” descrito por (Wynne *et al.*, 1970) se evaluó la significancia de la heterosis y heterobeltiosis respecto al promedio de los progenitores con la fórmula $t = (F_{1ij} - PM_{ij}) / (\sqrt{3/2r(CME)})$ y $t = (F_{1ij} - BP_{ij}) / (\sqrt{3/2r(CME)})$, la F_{1ij} : es la media del híbrido F_1 ; PM_{ij} : es la media del progenitor; BP :

es la media del mejor progenitor; CME: es el cuadrado medio del error y finalmente r : es el número de repeticiones. La aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) se calcularon siguiendo el método 2 del dialélico de Griffing (Griffing, 1956). Con el programa DIALLEL-SAS se estimó los efectos de ACG y ACE (Zhang y Kang, 2003).

1.5 RESULTADOS

1.5.1 Análisis de varianza de progenitores y sus cruzas F₁

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas en progenitores y cruzas F₁ en la mayoría de las variables, excepto en CD, APB y AF (Cuadro 2). Se observaron efectos altamente significativos ($P \leq 0.001$) de la ACG en siete de las 11 variables, mientras que la ACE tuvo diferencias altamente significativas en RFF, RFS, PFS y significativas AP, LF y NFP. El menor coeficiente de variación entre las variables se observó en la longitud de frutos (LF) (6.92 %), longitud de pedicelo (LP) (7.39 %) y altura de planta (AP) (9.23 %); mientras que en las variables NFP, RFF y RFS fue mayor al 20 % (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para características agronómicas y rendimiento, en poblaciones de Chile Guajillo.

Variables evaluadas	Análisis de varianza					CV (%)
	Repetición	Progenitores y cruzas F ₁	ACG	ACE	Error	
gl	3	44	8	36	132	
Altura de planta (cm)	438.22**	111.10*	75.98	118.91*	73.22	9.23
Cobertura del docel	950.06**	58.89	52.66	60.28	48.32	10.25
Altura de la primera bifurcación (cm)	5.90	2.55	4.85	2.05	2.53	27.82
Número de frutos por planta	60.61**	24.89***	52.24***	18.81*	11.81	25.07
Longitud de fruto (cm)	1.22	1.87***	4.90***	1.20*	0.81	6.92
Ancho de fruto (cm)	0.28	0.30	0.61	0.23	0.37	14.79
Longitud del pedúnculo (cm)	0.37	0.34***	0.85***	0.23	0.17	7.39
Peso de frutos frescos (g)	16.81	29.05***	80.93***	17.52	14.30	10.74
Peso de frutos secos (g)	0.51	1.00***	225.43**	125.06**	0.48	12.74
Rendimiento fruto fresco (t ha ⁻¹)	23.22*	19.54***	28.45***	17.56***	7.96	22.50
Rendimiento fruto seco (t ha ⁻¹)	2.70**	1.84***	3.74***	1.42***	0.63	26.38

*, **, ***: Significativo a 0.05, 0.01, 0.001 respectivamente. ACG= aptitud combinatoria general; ACE= aptitud combinatoria específica; CV= coeficiente de variación; gl= grados de libertad.

Los resultados muestran la variación existente en las poblaciones y sus cruzas, lo cual se debe, a que dichas poblaciones provienen de una amplia base genética. Resultados similares han sido reportados por Pech *et al.* (2010) para RF, NFP, AP y LF en Chile dulce.

Las ACG de las poblaciones y sus cruzas difirieron significativamente ($P \leq 0.001$) en NFP, LF, LP, PFF, PFS, así como el RFF y RFS en $t \text{ ha}^{-1}$. En el caso de la ACG se observaron diferencias significativas en las variables NFP, LF, LP, PFF, PFS, RFF Y RFS y para ACE en las variables AP, NFP, PFS, RFF Y RFS. Como se observa en el Cuadro 2, las ACG son mayores en magnitud que las de ACE en la mayoría de las variables excepto en AP (75.98) y CD (52.6), por lo tanto, los caracteres evaluados del germoplasma se asociaron más con efectos aditivos que con los no aditivos, lo que indica que se pueden lograr ganancias satisfactorias con la selección de estos caracteres (Medeiros *et al.*, 2014). Resultados similares fueron observados por Medeiros *et al.* (2014) y Sitaresmi *et al.* (2010) quienes reportan que el NFP, PF LF, DF de *C. annuum*, y *C. bacatum* var. Pendulum, estuvieron más asociados con efectos aditivos.

Para ACE se encontraron efectos significativos ($P \leq 0.05$) en AP, NFP, LF y altamente significativos ($P \leq 0.001$) PFS, RFF y RFS, lo que indica presencia de acción genética no aditiva (dominancia) en estos caracteres (Cuadro 2). De manera similar, Esquivel *et al.* (2011) observaron efectos significativos para ACE en NFP, DF y PFF; mientras que Pech *et al.* (2010) reportaron que en chile dulce no observaron significancia en PFF, AP y LF.

1.5.2 Comparación de medias de las cruzas y poblaciones de las variables evaluadas de chile Guajillo

Para el caso de la comparación de medias solo se tomaron 11 de las 36 cruzas que presentaban mayor rendimiento y los nueve progenitores involucrados (Cuadro 3). Además, se observa que de las ocho variables analizadas hubo diferencias mayores al 20% en el promedio de RFS, RFF, y NFP de las cruzas con respecto al promedio de poblaciones;

mientras que en el resto de las variables analizadas las diferencias fueron menores de 10%.

El incremento en el rendimiento de la variable RFS, es considerado muy importante debido a que este tipo de chile se consume en seco, y además está relacionada con el incremento en el NFP.

Cuadro 3. Comparación de medias de las poblaciones y cruzas de chile Guajillo de las variables evaluadas.

Población y cruzas	RFS	CONV	RFF	PPF	PFS	NFP	LF	AP	LP
P1	2.74 a-d	4.44	12.17 a-d	37.29 ab	5.62 a	13.00 a-c	12.85 ab	93.75 ab	5.81 a-c
P2	2.64 a-d	4.92	12.99 a-d	33.96 ab	5.33 a	13.44 a-c	12.88 ab	93.94 ab	5.53 a-c
P3	3.02 a-d	3.41	10.31 a-d	30.84 ab	4.71 a	14.53 a-c	11.58 ab	89.69 ab	5.15 a-c
P4	3.85 a-d	3.74	14.40 a-d	32.71 ab	4.86 a	16.43 ab	13.54 ab	92.31 ab	5.94 a-c
P5	4.15 a	3.29	13.67 a-d	32.30 ab	4.92 a	15.75 a-c	11.22 b	85.75 ab	5.42 a-c
P6	2.99 a-d	3.75	11.23 a-d	30.63 ab	4.85 a	13.86 a-c	11.16 b	96.19 ab	4.98 c
P7	3.39 a-d	3.93	13.34 a-d	36.04 ab	5.15 a	13.45 a-c	13.16 ab	97.84 ab	5.96 a-c
P8	1.50 cd	4.68	7.02 cd	32.92 ab	4.56 a	8.50 bc	12.99 ab	83.50 ab	5.66 a-c
P9	2.31 a-d	4.54	10.51 a-d	34.79 ab	5.26 a	12.35 a-c	12.36 ab	94.56 ab	5.51 a-c
Promedio	2.95	4.08	11.74	33.50	5.02	13.48	12.42	91.95	5.55
P1xP9	3.90 ab	3.7	14.44 a-d	36.04 ab	5.76 a	17.32 ab	13.19 ab	101.75 a	5.55 a-c
P3xP4	3.90 ab	4	15.62 ab	36.25 ab	6.01 a	17.00 ab	13.27 ab	97.00 ab	5.86 a-c
P4xP6	3.89 ab	3.2	12.48 a-d	35.00 ab	5.62 a	15.20 a-c	13.93 a	98.50 ab	6.00 a-c
P2xP6	3.82 ab	3.97	15.17 ab	34.58 ab	5.63 a	17.05 ab	12.87 ab	92.63 ab	5.28 a-c
P3xP5	3.79 ab	3.3	12.53 a-d	34.58 ab	5.46 a	15.28 a-c	13.45 ab	94.94 ab	5.04 bc
P4xP9	3.76 a-c	4.28	16.10 a	37.71 ab	6.02 a	16.83 ab	13.46 ab	101.00 ab	5.83 a-c
P5xP6	3.68 a-c	4.16	15.32 ab	28.54 b	4.59 a	18.60 a	12.65 ab	96.00 ab	5.52 a-c
P3xP9	3.60 a-c	3.09	11.13 a-d	32.30 ab	5.35 a	14.58 a-c	12.51 ab	88.06 ab	5.60 a-c
P3xP7	3.57 a-d	3.51	12.54 a-d	34.38 ab	5.43 a	14.10 a-c	12.77 ab	101.19ab	5.74 a-c
P2xP5	3.45 a-d	4.23	14.62 a-c	38.75 ab	5.86 a	15.70 a-c	13.86 a	98.25 ab	5.79 a-c
P7xP9	3.44 a-d	4.03	13.88 a-d	38.54 ab	6.06 a	15.70 a-c	13.20 ab	81.87 ab	5.50 a-c
Promedio	3.71	3.77	13.98	35.15	5.61	16.12	13.20	91.56	5.61

Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$). RFS: Rendimiento de fruto seco ($t\ ha^{-1}$); RFF: Rendimiento de fruto fresco ($t\ ha^{-1}$); CONV: Conversión RFF a RFS ($t\ ha^{-1}$); PPF: Peso promedio de fruto fresco (g); PFS: Peso promedio de fruto seco (g); NFP: Número de frutos por planta; LF: Longitud de fruto (cm); AP: Altura de planta (cm); LP: Longitud de pedicelo (cm).

En este caso solo las poblaciones P5 y P8 presentan diferencias estadísticas en el RFS, aunque todas las poblaciones presentan rendimientos mayores de 2 a 4 $t\ ha^{-1}$ valores por

arriba de la media nacional de 1.46 t ha^{-1} , a excepción de la población 8 (SAGARPA SIAP, 2017). Los resultados del mayor rendimiento se explican por el origen de las poblaciones, debido a que provienen de colectas que fueron seleccionadas por presentar mayor rendimiento.

Aunque solo hubo diferencias estadísticas entre las P5 y P8 y que la P5 se destaca junto con la P4 y P7 por presentar rendimientos más altos en RFS, RFF y en el NFP. Dichas poblaciones podrían ser seleccionadas para usarse como variedades *per se*.

En cuanto a la variable LF de las poblaciones, variaron de 11.16 para la P6 a 13.54 para la P4. La mayoría de las poblaciones presentaron valores por arriba de la media reportada por Laborde y Pozo (1982), excepto para las poblaciones P3, P6 y P9 que se encuentran en la media reportada por estos autores de 10 a 12 cm. La diferencia de estas tres últimas poblaciones, con el resto, puede deberse a que provienen de la selección de frutos al que se les denominó Guajillo fruto chico; mientras que para las variables AP y LP no presentaron diferencias estadísticas entre las diferentes poblaciones.

Para altura de planta (AP) se observa que las cruzas P1 x P9, P3 x P7 y P4 x P9 presentan una altura superior al metro y el resto oscila entre 0.77 a 0.98 m. Estos resultados sugieren que, para este tipo de chile, una mayor altura de planta no implica necesariamente mayor rendimiento de fruto. En el mejoramiento genético la altura de planta adquiere relevancia al considerar el tipo de manejo al que será sometido; así, las plantas compactas y de porte mediano son idóneas para el cultivo en campo, mientras que las plantas altas o con hábito de crecimiento indeterminado serán óptimas para el cultivo en invernadero (Pech *et al.*, 2010; Greenleaf, 1986).

Con la cruz P5 x P6 fue superior y se obtuvo el mayor NFP (18.6) respecto a las poblaciones y cruzas, en la cruz P2 x P5 presento la mayor LF. La obtención del mayor PFF fue posible con las cruzas P2 x P5 (38.75 g) y P7 x P9 (38.54 g), respecto a las poblaciones (Cuadro 3).

El mayor RFF se observa en la cruz P4 x P9, lo cual puede deberse a que es una de las cruzas que presentan mayor NFP, LF y AP. Sin embargo, que a pesar del alto RFF se requiere un mayor número de frutos verdes (CONV=4.28) para obtener una tonelada de fruto seco; mientras que la P3 x P9 se obtuvo el menor RFF (11.13), un promedio de 15 frutos por planta y menor en LF y AP. La ventaja que presenta esta cruz respecto a las demás es de que requiere menos unidades de fruto verde (CONV=3.09) para proporcionar una tonelada de fruto seco. Tanto la P3 como la P9 son Guajillos de fruto chico y provienen de lugares distantes, es decir, Zacatecas y Guanajuato, respectivamente. Además, se puede observar que en las cruzas donde interviene la P9 como macho dos de esas cruzas (P1 x P9, P4 x P9) presentan la mayor AP y en las cruzas (P3 x P9 y P7 x P9) presentan las plantas de menor altura.

Estos resultados destacan que existe gran variabilidad entre las cruzas y poblaciones para las variables de rendimiento. De manera similar, Do Nascimento *et al.* (2014) en *C. annuum* y Patel *et al.* (2010) también reportaron resultados coincidentes respecto a longitud del fruto. De acuerdo con Sitaresmi *et al.* (2010), mostraron que en las cruzas que realizaron, observaron mayor peso de fruto por planta, así como mayor número de frutos por planta, lo que pone de manifiesto las grandes ventajas de obtener rasgos genéticos mediante el cruzamiento entre poblaciones de *Capsicum* spp.

1.5.3 Capacidad combinatoria de las poblaciones de Chile Guajillo

En el Cuadro 4 se muestra que la aptitud combinatoria general es importante para la selección de padres apropiados en la hibridación, ya que da una idea si una población en particular se combina bien en una cruce (Nagaraju *et al.*, 2017). La P5 mostró un valor positivo y significativo ($P \leq 0.05$) en ACG en la variable NFP (1.08*), seguida de la P6 (0.97*), mientras que la P8 (-1.94***) mostró el valor más bajo, altamente significativo pero negativo, para la misma variable. Sin embargo, la P5 en la variable PFF mostró un efecto negativo en la ACG (-0.22), lo que indica que la P5 produjo un mayor NFP pero de bajo peso. En cambio, la P1 mostró un valor positivo y altamente significativo ($P \leq 0.001$) de ACG para la variable PFF, pero un efecto negativo y altamente significativo en la variable NFP (-1.53**), lo que indica que dicho comportamiento es inverso ya que se produjeron pocos frutos por planta, pero con mayor peso.

Los valores de la ACG para la variable RFS ($t \text{ ha}^{-1}$), la P5 fue la mejor, seguida por P4; mientras que la de menor valor de ACG fue la P8. Estas poblaciones muestran valores positivos y significativos de ACG en las variables RFF, LF y LP en la P4, mientras que la P5 solo en NFP (Cuadro 4). La P5 mostró una diferencia significativa en NFP, lo que indica que la planta tuvo un buen número de frutos y un PFF no muy pesados, pero que se refleja en el mayor RFS $t \text{ ha}^{-1}$. Para la P4 aunque no presentó diferencias significativas en el NFP, su PFF también fue alto lo que se reflejó tanto en el RFF así como en el RFS $t \text{ ha}^{-1}$.

Cuadro 4. Aptitud Combinatoria General (ACG) de nueve poblaciones de Chile Guajillo.

Pob.	RFS	RFF	PFF	PFS	NFP	LF	AF	AP	LP
P1	-0.31**	-0.80*	1.94***	0.30**	-1.53**	0.29*	-0.04	-0.54	0.20***
P2	-0.24*	0.22	0.73	0.12	-0.04	0.26*	0.17*	-0.35	-0.05
P3	0.12	-0.67	-1.34**	-0.15	0.49	-0.39**	0.12	0.03	-0.14*
P4	0.23*	1.19**	0.86	0.15	0.78	0.40**	0.11	0.8	0.14*
P5	0.33**	0.68	-0.22	-0.01	1.08*	-0.17	-0.19*	-0.49	-0.06
P6	0.21	0.07	-2.70***	-0.33***	0.97*	-0.52***	-0.11	2.29	-0.18**
P7	0.08	0.36	0.57	0.09	-0.04	0.17	-0.06	0.06	0.15**
P8	-0.53***	-1.38***	0.4	-0.13	-1.94***	0.2	0.04	-2.59*	0.05
P9	0.12	0.33	-0.24	-0.03	0.55	-0.24	-0.04	0.77	-0.12*

*, **, *** Diferente de cero a una probabilidad de 0.05, 0.01 y 0.001, respectivamente. Pob.: Población; RFS: Rendimiento de fruto seco (t ha⁻¹); RFF: Rendimiento de fruto fresco (t ha⁻¹); PFF: Peso promedio de fruto fresco (g); PFS: Peso promedio de fruto seco (g); NFP: Número de frutos por planta; LF: Longitud de frutos (cm); AF: Ancho de fruto; AP: Altura de planta (cm); LP: Longitud de pedicelo (cm).

1.5.4 Capacidad combinatoria específica, heterosis y heterobeltiosis en cruzas de Chile Guajillo

La aptitud combinatoria específica (ACE) mide el comportamiento específico de cada híbrido en relación con sus padres correspondientes y estima los efectos genéticos dominantes (Sprague y Tatum, 1942). Tanto la heterosis como la heterobeltiosis son fenómenos biológicos que han despertado interés debido a su importancia en mejoramiento genético de plantas. Los resultados de estos fenómenos se muestran en el Cuadro 5.

Los efectos de ACE significativos, para RFF se presentaron en las cruzas 1x9 y 3x4, con 3.61, 2.55 (t ha⁻¹), en RFS, sobresalieron las cruzas P1 x P9 (1.43) y P2 x P6 (0.83 t ha⁻¹). La cruz P1 x P9 (6.94 %) presentó el valor más alto, para la variable NFP (Cuadro 5). Nascimento *et al.* (2014) observaron que en cuatro de sus progenitores obtuvieron los valores más altos para la ACG, y sus cruzas presentaron mayor valor de ACE, indicando con ello que pueden ser seleccionados con el objetivo de aumentar el rendimiento por planta y obtener frutos con mayor cantidad de pulpa, alto contenido de biomasa seca y fresca. Por su parte

Rohini *et al.* (2017), seleccionaron seis de 30 cruzas como los mejores híbridos, ya que mostraron una alta Heterobeltiosis, dichas cruzas podrán ser usadas para posteriores programas de mejoramiento. Las variables RFS y NFP, mostraron los efectos de heterosis (54.46 y 36.65 % respectivamente) y heterobeltiosis (42.34 y 33.2) más altos, en la cruza P1 x P9 (Cuadro 5). Por lo tanto, estos caracteres podrían ser mejorados más eficientemente mediante métodos de mejoramiento genético que exploten los efectos de acción génica no aditiva, como la hibridación (Pech *et al.*, 2010). Resultados similares fueron reportados por Nagaraju y Sreelathakumary (2016), en el género *Capsicum* donde el efecto más alto de ACE para el NFP lo registraron en la cruza CA-6xCA-23, mostrando efectos de ACE significativos para otros caracteres como la altura de la planta, peso del fruto, rendimiento del fruto verde por planta, longitud del fruto, diámetro del fruto. Por su parte, Hernández-Pérez *et al.* (2011) también encontraron resultados similares, donde las mejores cruzas fueron P6 x P16 y P4 x P6, la cruza P1 x P118 mostraron altos rendimientos. Por su parte, Sitaresmi *et al.* (2010) reportan heterosis alta para la cruza IPB C8xIPB C19 para el peso de fruto por planta y la cruza IPB C8xIPB C15 para el mayor número de frutos por planta, en IPB C19 se encontró la mejor ACG para el peso de fruto por planta. Estudios realizados por Medeiros *et al.* (2014) registraron valores más altos para ACE y en heterosis en el número de frutos por planta en los híbridos UENF 1616Xuenf1629 y UENF1616Xuenf1732.

La heterosis y heterobeltiosis con valor más alto, para PFF se presenta en la cruza P2 x P5 y para la variable PFS en P3 x P4.

Cuadro 5. Aptitud combinatoria específica (ACE), porcentaje de heterosis (Hm) y heterobeltiosis (Hs) en las cruzas de chile Guajillo

CRUZA	RFS			RFF			PFF			PFS		
	ACE	Hm %	Hs %	ACE	Hm %	Hs%	ACE	Hm %	Hs %	ACE	Hm %	Hs%
P1xP9	1.43***	54.46***	42.34**	3.61*	27.34*	18.65	-2.68	0	-3.35	-0.39	5.88	2.49
P2xP5	0.34	1.62	-16.87	1.18	9.68	6.95	3.02	16.96**	14.10*	0.30	14.34*	9.94
P2xP6	0.83*	35.70*	27.76*	2.34	25.27*	16.78	1.34	7.08	1.83	0.39	10.61	5.63
P3xP4	0.54	13.54	1.3	2.55*	26.43*	8.47	1.51	14.08*	10.82	0.56	25.60*	23.66**
P3xP5	0.32	5.72	-8.67	-0.03	4.5	-8.34	0.92	9.53	7.06	0.16	13.4	10.98
P3xP7	0.35	11.39	5.31	0.31	6.05	-6	-0.08	2.81	-4.61	0.04	10.14	5.44
P3xP9	0.12	35.08*	19.21	-1.97	6.92	5.9	-3.06	-1.57	-7.16	-0.37	7.32	1.71
P4xP6	0.43	13.74	1.04	-1.32	-2.61	-13.33	1.62	10.51	7.00	0.35	15.76*	15.64*
P4xP9	0.78	22.08	-2.34	1.51	29.27*	11.81	-2.36	11.73*	8.39	-0.46	18.97*	14.45*
P5xP6	0.12	3.08	-11.33	2.03	23.05*	12.07	-3.76*	-9.3	-11.64	-0.52	-6.04	-6.71
P7xP9	0.43	20.7	1.47	0.76	16.39	4.05	2.66	8.82	6.94	0.04	16.43*	15.21*

*, **, *** Diferente de cero a una probabilidad de 0.05, 0.01 y 0.001, resp. RFS: Rendimiento de fruto seco (t ha⁻¹); RFF: Rendimiento de fruto fresco (t ha⁻¹); PFF: Peso promedio de fruto fresco (g); PFS: Peso promedio de fruto seco (g); NFP: Número de frutos por planta; LF: Longitud de frutos (cm); AP: Altura de planta (cm); LP: Longitud de pedicelo (cm).

Continuación...

CRUZA	NFP			LF			AP			LP		
	ACE	Hm %	Hs %	ACE	Hm %	Hs %	ACE	Hm %	Hs %	ACE	Hm %	Hs %
P1xP9	6.94***	36.65*	33.2*	-0.64	4.67	2.67	10.96*	8.07	7.60	-0.34	-2.04	-4.62
P2xP5	1.27	7.57	-0.32	0.74	15.03***	7.66*	6.4	9.36	4.59	0.30	5.88	4.83
P2xP6	2.73	24.91	23.02	0.1	7.08	-0.06	-2.01	-2.56	-3.7	-0.09	0.57	-4.37
P3xP4	2.02	9.82	3.47	0.24	5.67	-1.97	3.48	6.59	5.08	0.25	5.64	-1.44
P3xP5	0	0.92	-2.98	0.98*	17.93***	16.12***	2.71	8.23	5.85	-0.38*	-4.66	-7.04
P3xP7	-0.05	0.79	-2.96	-0.03	3.22	-2.99	8.40*	7.92	3.42	0.12	3.36	-3.7
P3xP9	-0.32	8.48	0.34	-0.54	4.54	1.26	-8.5	-4.41	-6.87	0.05	5.08	1.63
P4xP6	-0.26	0.36	-7.49	1.03*	12.78***	2.86	2.72	4.51	2.4	0.43*	9.84*	0.98
P4xP9	2.94	16.96	2.43	-0.01	3.93	-0.62	4.76	8.09	6.81	0.26	1.78	-1.93
P5xP6	2.84	25.63*	18.1	0.32	13.07***	12.73**	1.51	5.53	-0.2	0.14	6.13	1.88
P7xP9	1.31	21.71	16.73	0.05	3.48	0.3	-6.62	-14.89**	-16.32***	-0.08	-4.01	-7.65*

*, **, *** Diferente de cero a una probabilidad de 0.05, 0.01 y 0.001, resp. RFS: Rendimiento de fruto seco (t ha⁻¹); RFF: Rendimiento de fruto fresco (t ha⁻¹); PFF: Peso promedio de fruto fresco (g); PFS: Peso promedio de fruto seco (g); NFP: Número de frutos por planta; LF: Longitud de frutos (cm); AP: Altura de planta (cm); LP: Longitud de pedicelo (cm).

Los efectos de la ACE para la mayor altura de planta se presentaron en las cruzas P1 x P9 y P3 x P7, con valores de 10.96 y 8.40 cm, respectivamente, la craza P2 x P5 (9.36) presentó el valor más alto de Hm, así también, con la craza P1 x P9 se presentó el valor más alto para heterobeltiosis (7.60) (Cuadro 5).

Respecto a los efectos de ACE para LF (Cuadro 5), las cruzas que mostraron valores positivos significativos fueron P3 x P5 (0.98) y P4 x P6 (1.03). Para la LP las cruza con mayor efecto de ACE significativo y positivo corresponde a la cruza P4 x P6. Resultados similares fueron reportados por Medeiros *et al.* (2014) en cruzas de *Capsicum baccatum* var. *pendulum*, donde obtuvieron los valores más altos de ACE para la variable LF con las cruzas UENF 1616 x UENF 1629 y UENF 1629 x UENF 1639, estos autores también reportaron heterosis positiva para la mayoría de las cruzas para LF.

En la expresión de heterosis (Cuadro 5), las cruzas que presentaron los valores significativos más altos y positivos para la variable LF fueron P2 x P5, P3 x P5, P4 x P6 y P5 x P6 y en P5, mientras que las cruzas con mayor Hs para la misma variable fueron P2 x P5, P3 x P5 y P5 x P6 con valores de 7.66, 16.12 y 12.73 % respectivamente. Estos resultados son similares con los de Rao y reddy (2017), para las variables AP, LF, PF y rendimiento de fruto. Otros resultados similares fueron observados por Nagaraju y Sreelathakumary (2016), para las variables AP, LF, PF, NFP y rendimiento. Para la variable LP, el valor más alto de heterosis fue en la cruza P4 x P6 (9.84) y para la heterobeltiosis, se observo en la cruza P2 x P5 (4.83). Resultados similares fueron reportados por Patel *et al.* (2010), con una heterobeltiosis de 24.24 % al cruzar AVNPC-131 x acs-03-14. La estimación de la heterosis mostró que el número de cruzas con heterosis fue mayor en comparación con la heterobeltiosis para todas las variables. Estos resultados son similares con los de Bhutia *et al.* (2015), para AP, LF, RFP y NFP; Singh *et al.* (2012), para AP; y NFP; Patel *et al.* (2010), para LF.

1.6 DISCUSIÓN

En México fueron domesticadas varias especies de plantas, entre ellas la del chile, el cual ha sido de los principales cultivos de importancia económica y cultural. Por su importancia entonces, existe la necesidad de generar nuevos materiales para abastecer el mercado nacional e internacional.

La heterosis puede extrapolarse como la suma total de muchos rasgos fisiológicos y fenotípicos incluidos la tasa de crecimiento vegetativo (Baranwal *et al.*, 2012). La mayoría de las líneas endogámicas parentales tienen un pequeño número de alelos superiores, las variedades híbridas de alto rendimiento tienen varios; por tanto, la acumulación de numerosos alelos superiores raros con dominancia positiva es un importante contribuyente a los fenómenos heteróticos (Huang *et al.*, 2015). La heterosis como herramienta genética, tiene un papel importante en el rendimiento de los cultivos y en muchos casos de importancia comercial como lo son el tomate, sandía, repollo, coliflor y pepino (Vaishnav *et al.*, 2009).

Las poblaciones utilizadas de chile Guajillo muestran diferencias significativas para las variables de rendimiento, lo que indica su alta divergencia y capacidad para combinarse entre ellas, obteniéndose con ello una alta ACE la cual puede presentar un impacto positivo pero significativo en el rendimiento fresco y seco de frutos. Así pues, es posible aprovechar tales efectos heteróticos que se fijarán en las generaciones posteriores, además seleccionar los parentales con buen comportamiento agronómico de sus híbridos (Méndez-Natera *et al.*, 1997). En nuestro estudio, las cruzas P5 X P6 y P1 x P9 presentaron mayor número de frutos dando valores altos tanto de heterosis en la primera cruce y heterosis y herobeltiosis en la segunda. Características deseadas en el mejoramiento de *Capsicum* es la longitud de fruto y

nuestros resultados destacan un buen comportamiento de las cruzas para dicho carácter, que incluyeron a las cruzas: P3 x P5, P4 x P6, P5 x P6. La comercialización de esta especie de chile es en seco, por tanto, algunas de las cruzas con valores altos de heterosis y heterobeltiosis que destacaron fueron; P1 x P9, P2 x P6 y P3 x P4. La capacidad de combinación positiva de las poblaciones para generar híbridos con características favorables en el rendimiento, indica el predominio de la acción de gen aditivo en la herencia para dicha variable. La acción de un gen aditivo en la herencia se ha observado en capsaicinoides en *C. pubescens* (Zewdie *et al.*, 2001). Estudios han sugerido que la hibridación es el método de mejoramiento más adecuado para la obtención de altos rendimientos y un mayor número de frutos por planta en *C. annuum*, con base a estudios de ACG y heterosis (Pech *et al.*, 2010). Los híbridos con buen potencial de rendimiento y características de frutos en *Capsicum* pueden desarrollarse a partir de los padres (Geleta y Labuschagne, 2004). El cruzamiento que involucra a parientes distantes relacionados, proporciona un amplio espectro de variabilidad que asegura mayor eficiencia de selección de mejores genotipos (Banerjee *et al.*, 2007). El aislamiento de líneas puras a partir de las progenies de las F₁ heteróticas es una forma posible de mejorar el rendimiento de frutos y calidad de los chiles (Khalil y Hatem, 2014). Estudios realizados por Do Rêgo *et al.* (2011) también encontraron valores positivos en la ACG y ACE relacionados con la calidad del fruto de chiles (peso de frutos, ancho de fruto, longitud de fruto y grosor de pericarpio). Empero, los fitomejoradores requieren tener una comprensión científica más detallada de la herencia o el potencial de la heredabilidad para la expresión de estas características de interés, para explotar de manera más efectiva las líneas parentales y producir híbridos superiores (Butcher *et al.*, 2013). Se ha observado en muchos casos, que el mejor padre del híbrido desarrollado es inferior a las variedades comerciales, por tanto, una buena selección de parentales con mejor respuesta heterótica debe ser llevado

a cabo (Shrestha *et al.*, 2011). El enfoque sistémico para desarrollar híbridos F₁ en cualquier cultivo dependen principalmente de la magnitud de la heterosis deseable (Sharma *et al.*, 2013). Nuevos estudios para el mejoramiento genético del género *Capsicum* sugieren redes de correlación ponderada, para descubrir estructuras de correlación y patrones de enlaces en las características morfo-agronómicas (Silva *et al.*, 2016), lo que ayudaría a incrementar la efectividad en la selección del genotipo. En los chiles por ser una fuente rica de nutrientes de suma importancia en la dieta humana y por prevenir enfermedades como el cáncer, enfermedades cardiovasculares, se requiere incrementar el potencial de rendimiento (Sood *et al.*, 2010).

Finalmente, los programas de desarrollo de híbridos deben ser continuos para que las semillas estén disponibles para los productores a un costo accesible (Chaudhary *et al.*, 2013). Así también, los esfuerzos deben centrarse para el desarrollo de híbridos basados en la esterilidad masculinas usando líneas estériles masculinas citoplasmáticas para minimizar el costo de las semillas F₁ (Tembhurne y Rao, 2012). También, deben ser usados los marcadores moleculares desarrollados para el mapeo y selección asistida en el mejoramiento de chiles (Minamiyama *et al.*, 2006; Ince *et al.*, 2010), pero también, las poblaciones de *C. annuum* en México son un recurso valioso que debe ser conservado (Pacheco-Olvera *et al.*, 2012). Investigaciones futuras del chile Guajillo de interés deben incluir, aspectos como la fisiología de la semilla, vigor, germinación, peso volumétrico de raíces y resistencia de frente al estrés biótico y abiótico.

1.7 CONCLUSIONES

Las poblaciones que presentaron la mayor ACG para rendimiento seco fueron P5 y P4 con 0.33 y 0.23 respectivamente, lo que las hace de gran potencial para usarse como poblaciones en programas de mejoramiento genético de Chile.

Se identificaron poblaciones cuyas cruces originaron plantas con características deseables principalmente para el RFS, RFF y NFP tanto para la ACG, heterosis y heterobeltiosis (P1 x P9 y P2 x P6).

Agradecimientos: Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado de Genética. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante los estudios de FHM.

contribuciones de autoría: Fanny Hernández Mendoza y Tarsicio Corona Torres por el desarrollo y diseño experimental, análisis estadístico. Víctor García-Gaytán, Aquiles Carballo Carballo, Gabino García de los Santos, Salvador Miranda Colín, Irma Sánchez Cabrera y Fernando Gómez Merino correcciones del manuscrito.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener conflictos de intereses en el manuscrito.

1.8 BIBLIOGRAFÍA

- Banerjee, R.; Roychowdhuri, S.; Sau, H.; Das, B. K.; Ghosh, P.; Saratchandra, B. Genetic diversity and interrelationship among mulberry genotypes. *J. Genet. Genomics* **2007**, *34*, 691–697.
- Baranwal, V. K.; Mikkilineni, V.; Zehr, U. B.; Tyagi, A. K.; Kapoor, S. Heterosis: emerging ideas about hybrid vigour. *J. Exp. Bot.* **2012**, *63*, 6309–6314.
- Bhutia, N. D.; Seth, T.; Shende, V. D.; Dutta, S.; Chattopadhyay, A. Estimation of Heterosis, dominance effect and genetic control of fresh fruit yield, quality and leaf curl disease severity traits of chilli pepper (*Capsicum annuum* L.). *Sci. Hortic.* **2015**, *182*, 47–55, doi:10.1016/j.scienta.2014.11.017.
- Bravo, L.; Galindo, G.; Amador, M. Tecnología de producción de chile seco. *INIFAP CIRNOC Campo Exp. Zacatecas Libro Téc.* **2006**, 222.
- Butcher, J. D.; Crosby, K. M.; Yoo, K. S.; Patil, B.; Jifon, J. L.; Rooney, W. L. Heterosis in different F1 *Capsicum annuum* genotypes for fruit traits, ascorbic acid, capsaicin, and flavonoids. *Sci. Hortic.* **2013**, *159*, 72–79.
- Chaudhary, A.; Kumar, R.; Solankey, S. Estimation of heterosis for yield and quality components in chilli (*Capsicum annuum* L.). *Afr. J. Biotechnol.* **2013**, *12*, 6605–6610.
- Costa, M.; do Rêgo, M.; da Silva, A.; do Rêgo, E.; Barroso, P. Characterization and genetic diversity of pepper (*Capsicum* spp) parents and interspecific hybrids. *Genet Mol Res* **2016**, *15*, 1–12.
- de la Cruz-Lázaro, D.; Castañón-Najera, G.; Brito-Manzano, N.; Gómez-Vázquez, A.; Robledo-Torres, V.; Lozano del Río, A. Heterosis y aptitud combinatoria de poblaciones de maíz tropical. *Phyton* **2010**, *79*, 11–17.
- Do Nascimento, N.; Do Rego, E.; Nascimento, M.; Bruckner, C.; Finger, F.; Do Rego, M. Combining ability for yield and fruit quality in the pepper *Capsicum annuum*. *Genet. Mol. Res.* **2014**, *13*, 3237–3249.
- Do Rêgo, E. R.; Do Rêgo, M. M.; Cruz, C. D.; Finger, F. L.; Casali, V. W. D. Phenotypic diversity, correlation and importance of variables for fruit quality and yield traits in Brazilian peppers (*Capsicum baccatum*). *Genet. Resour. Crop Evol.* **2011**, *58*, 909–918.
- Esquivel Esquivel, G.; Castillo González, F.; Hernández Casillas, J. M.; Santacruz Varela, A.; García de los Santos, G.; Acosta Gallegos, J. A.; Ramírez Hernández, A. Heterosis en maíz del Altiplano de México con diferente grado de divergencia genética. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* **2011**, *2*, 331–344.
- Geleta, L.; Labuschagne, M. Hybrid performance for yield and other characteristics in peppers (*Capsicum annuum* L.). *J. Agric. Sci.* **2004**, *142*, 411–419.
- Greenleaf, W. Pepper breeding. *Breed. Veg. Crop* **1986**, 67–134.

- Griffing, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. J. Biol. Sci.* **1956**, *9*, 463–493.
- Hernández-Pérez, M.; López-Benítez, A.; Borrego Escalante, F.; López-Betancourt, S. R.; Ramírez-Meraz, M. Análisis dialélico del rendimiento de Chile por el Método IV de griffing. *Agron. Mesoam.* **2011**, *22*, 37–43.
- Huang, X.; Yang, S.; Gong, J.; Zhao, Y.; Feng, Q.; Gong, H.; Li, W.; Zhan, Q.; Cheng, B.; Xia, J. Genomic analysis of hybrid rice varieties reveals numerous superior alleles that contribute to heterosis. *Nat. Commun.* **2015**, *6*, 6258.
- Ince, A. G.; Karaca, M.; Onus, A. N. Polymorphic microsatellite markers transferable across *Capsicum* species. *Plant Mol. Biol. Report.* **2010**, *28*, 285–291.
- Khalil, M. R.; Hatem, M. Study on combining ability and heterosis of yield and its components in pepper (*Capsicum annum* L.). *Alexantia J Agric Res* **2014**, *59*, 61–71.
- Laborde C. J. A. y O. Pozo. 1982. Presente y pasado de Chile en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (SARH-INIA) 80 p.
- Medeiros, A. M.; Rodrigues, R.; Gonçalves, L. S. A.; Sudré, C. P.; Oliveira, H. S. de; Santos, M. H. dos Gene effect and heterosis in *Capsicum baccatum* var. Pendulum. *Ciênc. Rural* **2014**, *44*, 1031–1036.
- Méndez-Natera, J.; Rondón, A.; Merazo-Pinto, J. Heterobeltiosis en algodón (*Gossypium hirsutum* L.): rendimiento de algodón en rama, sus componentes y calidad de la fibra. *Bioagro* **1997**, *9*, 77–85.
- Minamiyama, Y.; Tsuro, M.; Hirai, M. An SSR-based linkage map of *Capsicum annuum*. *Mol. Breed.* **2006**, *18*, 157–169.
- Moreno-Pérez, E. del C.; Avendaño-Arrazate, C. H.; Mora-Aguilar, R.; Cadena-Iñiguez, J.; Aguilar-Rincón, V. H.; Aguirre-Medina, J. F. Diversidad morfológica en colectas de Chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) del centro-norte de México. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* **2011**, *17*, 23–30.
- Nagaraju, M. M.; Sreela Thakumary, I. Combining ability analysis for growth and yield characters in chilli (*Capsicum annuum* L). *Int. J. Farm Sci.* **2017**, *6*, 207–212.
- Pacheco-Olvera, A.; Hernández-Verdugo, S.; Rocha-Ramírez, V.; González-Rodríguez, A.; Oyama, K. Genetic diversity and structure of pepper (*Capsicum annuum* L.) from Northwestern Mexico analyzed by microsatellite markers. *Crop Sci.* **2012**, *52*, 231–241.
- Patel, M.; Patel, A.; Patel, J.; Patel, J. Research Article Heterosis for green fruit yield and its components in chilli (*Capsicum annuum* var. *longicum* (DG) Sendt) over environments. *Electron. J. Plant Breed.* **2010**, *1*, 1443–1453.
- Pech, M.; Anastácio, M.; Castañón Nájera, G.; Tun Suárez, J. M.; Mendoza Elos, M.; Mijangos Cortés, J. O.; Pérez Gutiérrez, A.; Latournerie Moreno, L. Efectos

- heteróticos y aptitud combinatoria en poblaciones de chile dulce (*Capsicum annuum* L.). *Rev. Fitotec. Mex.* **2010**, *33*, 353–360.
- Rao, P. G.; Reddy, K. M. Exploitation of mid parent heterosis in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) for yield and yield attributing traits. *Agric. Res. J.* **2017**, *54*, 117–119.
- Rohini, N.; Lakshmanan, V. Heterotic expression for dry pod yield and its components in chilli (*Capsicum annuum* var. *annuum*). *JAPS J. Anim. Plant Sci.* **2017**, *27*, 207–218.
- SAGARPA-SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>. Consultado en junio de 2019.
- Sharma, V. K.; Punetha, S.; Sharma, B. B. Heterosis studies for earliness, fruit yield and yield attributing traits in bell pepper. *Afr. J. Agric. Res.* **2013**, *8*, 4088–4098.
- Shrestha, S. L.; Luitel, B. P.; Kang, W. H. Heterosis and heterobeltiosis studies in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Hortic. Environ. Biotechnol.* **2011**, *52*, 278–283.
- Silva, A. R. da; Rêgo, E. R. do; Pessoa, A. M. dos S.; Rêgo, M. M. do Correlation network analysis between phenotypic and genotypic traits of chili pepper. *Pesqui. Agropecuária Bras.* **2016**, *51*, 372–377.
- Singh, D.; Pramod, T.; Jain, S. Heterosis studies for growth, flowering, and yield of chilli (*Capsicum annuum* L.). *Pantnagar J. Res.* **2012**, *10*, 61–65.
- Sitairesmi, T.; Sujiprihati, S.; Syukur, M. Combining ability of several introduced and local chilli pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes and heterosis of the offsprings. *J. Agron. Indones. Indones. J. Agron.* **2016**, *38* (3).
- Sood, S.; Kumar, N. Heterosis for fruit yield and related horticultural traits in bell pepper. *Int. J. Veg. Sci.* **2010**, *16*, 361–373.
- Sprague, G. F.; Tatum, L. A. General vs. Specific Combining Ability in Single Crosses of Corn 1. *Agron. J.* **1942**, *34*, 923–932.
- Steiner, A. A. The influence of the chemical composition of a nutrient solution on the production of tomato plants. *Plant Soil* **1966**, *24*, 454–466.
- Sudré, C. P.; Rodrigues, R.; Riva, E. M.; Karasawa, M.; Amaral Júnior, A. do Divergência genética entre acessos de pimenta e pimentão utilizando técnicas multivariadas. *Hortic. Bras.* **2005**, *23*, 22–27.
- Tembhurne, B.; Rao, S. Heterosis and combining ability in CMS based hybrid chilli (*Capsicum annuum* L.). *J. Agric. Sci.* **2012**, *4*, 89.
- Vaishnav, R.; Srivastava, K.; Singh, P. Heterosis and combining ability in chilli for yield and yield contributing traits (*Capsicum annuum* L.). *Asian J. Bio Sci.* **2009**, *4*, 244–248.
- Wynne, J.; Emery, D.; Rice, P. Combining Ability Estimates in *Arachis hypogaea* L. II. Field Performance of F1 Hybrids 1. *Crop Sci.* **1970**, *10*, 713–715.
- Zewdie, Y.; Bosland, P. W.; Steiner, R. Combining ability and heterosis for capsaicinoids in *Capsicum pubescens*. *HortScience* **2001**, *36*, 1315–1317.

Zhang, Y.; Kang, M. S. *DIALLEL-SAS: a program for Griffing's diallel methods*; In: Kang MS (ed) Handbook of formulas and software for plant geneticists and breeders. Food Products Press, New York **2003**, pp. 1-19

CAPÍTULO II. EFECTOS GENÉTICOS EN LA EXPRESIÓN DE LA CALIDAD DE LA SEMILLA DE CHILE GUAJILLO

Fanny Hernández Mendoza¹, Tarsicio Corona Torres^{1*}, Víctor Heber Aguilar Rincón¹, Fernando Gómez Merino², Aquiles Carballo Carballo¹, Gabino García de los Santos¹, Salvador Miranda Colin¹.

2.1 RESUMEN

Aun cuando se han hecho muchos estudios en caracteres agronómicos, no existe conocimiento sobre estudios que aborden los efectos genéticos en la calidad física y fisiológica de semillas en poblaciones nativas de Chile Guajillo (*Capsicum annuum* L.). El objetivo de esta investigación fue identificar los efectos de aptitud combinatoria general (ACG), y específica (ACE) en variables de calidad de semilla, así como determinar el tipo de acción génica en las mismas. Se analizaron semillas F₁ y F₂ de poblaciones nativas de Chile Guajillo mediante la prueba de envejecimiento acelerado y digitalización de imágenes de semillas. Los resultados obtenidos muestran que: 1) Todas las variables fueron significativas para la ACG y ACE, lo que indica que los efectos aditivos y no aditivos están involucrados en el control genético de estos caracteres; 2) En las cruzas de mayor promedio participó al menos un progenitor con alto efecto de ACG; 3) Los efectos de ACG fueron más importantes que los efectos de ACE para la calidad física de semilla, longitud y biomasa fresca de plántula; 4) En general la heredabilidad en sentido estrecho, varió de bajo a moderado (0.00-0.30); 5) La información generada sobre el efecto genético no aditivo en la calidad de semilla de Guajillo, puede utilizarse en programas de mejoramiento genético aplicando la técnica de hibridación y; 6) No existe relación alguna entre las mejores cruzas y los progenitores con efectos de ACG alto.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, cruzas, dialélico, poblaciones nativas.

GENETIC EFFECTS ON THE EXPRESSION OF THE QUALITY OF THE SEED OF PEPPER GUAJILLO

2.2 ABSTRACT

Even though many studies have been done in agronomic characters, there is no knowledge about studies that address the genetic effects on the physical and physiological quality of seeds in native populations of Guajillo chile (*Capsicum annuum* L.). The objective of this research was to identify the effects of general combining ability (GCA), and specific (SCA) on seed quality variables, as well as to determine the type of gene action in them. F₁ and F₂ seeds were analyzed from native populations of chili Guajillo through the accelerated aging test and digitization of seed images. The results obtained show that: 1) all the variables were significant for the GCA and SCA, which indicates that the additive and non-additive effects are involved in the genetic control of these characters; 2) In the crosses with the highest average, at least one progenitor with a high GCA effect participated; 3) The effects of GCA were more important than the effects of SCA for the physical quality of seed, length and fresh seedling biomass; 4) In general, heritability in the narrow sense varied from low to moderate (0.00-0.30); 5) The information generated about the non-additive genetic effect on the quality of Guajillo seed, can be used in breeding programs applying the hybridization technique and; 6) There is no relationship between the best crosses and parents with the effects of GCA high.

Keywords: *Capsicum annuum*, crosses, diallelic, native populations.

2.3 INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum annuum* L.) es una de las cinco especies domesticadas más importantes desde el punto de vista económico y nutricional en el mundo. Con más de 17 millones de toneladas, China es el productor más grande de chiles y pimientos frescos, seguido de México (2.7 t), Turquía (2.5 t) e Indonesia (2.0 t) (FAO, 2018a).

La calidad de semilla es definida como la suma de caracteres genéticos, físicos, fisiológicos y sanitarios, los cuales determinan su potencial de germinación, vigor y longevidad (Goggi *et al.*, 2008). De acuerdo con la FAO (2018b), el uso de semillas de alta calidad de variedades seleccionadas para los productores, ayuda a garantizar una mayor producción agrícola y satisfacer los crecientes desafíos ambientales. Por lo tanto, es importante investigar la relación del efecto genético en la calidad de semilla en este cultivo de gran importancia para México.

Hay varios factores responsables del bajo rendimiento en plantas cultivadas. Algunos de estos factores son semilla de baja calidad, con mala germinación y bajo vigor de plántula. Cabe señalar que la germinación y vigor de plántula están influenciados por el tamaño de la semilla, por lo que se debe prestar atención a la selección y uso de semillas de buena calidad desde el inicio mismo del programa de mejoramiento genético (Sulewska *et al.*, 2014), como ha ocurrido en otras especies agrícolas.

El análisis dialélico se utiliza como una herramienta para obtener información sobre efectos genéticos y existen métodos para estudiar características de un conjunto de progenitores. Por ejemplo, los diseños dialélicos propuestos por Griffing (1956) facilitan la identificación de las cruzas (combinaciones) e individuos superiores. En una población de plantas, la aptitud combinatoria debe determinarse con el objeto de seleccionar progenitores con alta expresión de

esta característica (Manjarrez *et al.*, 2014). La aptitud combinatoria general (ACG) describe el comportamiento promedio de una línea en combinaciones híbridas, en tanto que la aptitud combinatoria específica (ACE) se refiere a la desviación de una crucea respecto al comportamiento promedio de los padres (Sprague *et al.*, 1942; León-Velasco *et al.*, 2009).

Estudios sobre aptitud combinatoria para calidad física y fisiológica de semillas, se han reportado en diferentes cultivos como maíz palomero (*Zea mays* L.) (Moterle *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2015; de la Torre y Biasutti, 2015; González-Torres *et al.*, 2017), en quinoa (*Chenopodium quinoa*) Willd. (Mastebroek *et al.*, 2002), caupí (*Vigna unguiculata*) (Ushakumari *et al.*, 2010), mostaza (*Brassica juncea* L.) (Gami y Chauhan, 2013; Saeed *et al.*, 2013) y algodón (*Gossypium arboreum* L.) (Vekariya *et al.*, 2017). Aunque en el género *Capsicum* hay investigaciones para rendimiento y peso de semillas (Do Nascimento *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2014; Bhutia *et al.*, 2015), no existen investigaciones sobre la aptitud combinatoria en calidad física de semillas. Si bien los estudios sobre el rendimiento y calidad de fruto han sido importantes, no se han evaluado a cabalidad los efectos de la calidad de semilla, la cual es determinante para obtener éxito en el establecimiento del cultivo y la producción de semilla mejorada en Chile Guajillo.

Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue identificar las variables que se relacionan con calidad física y fisiológica y que tienen mayor aptitud combinatoria general (ACG) al mismo tiempo que identificar las cruces que presentan mayor aptitud combinatoria específica (ACE) para su uso en el desarrollo de variedades; además determinar el tipo de acción génica y heredabilidad para calidad física y fisiológica de semilla de Chile Guajillo en México.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Localización del sitio experimental

La presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis de semillas del Colegio de Postgraduados (CP) Campus Montecillo, en Texcoco, Estado de México.

2.4.2 Material genético

Los progenitores se formaron por similitud en tamaño y forma del fruto de 144 colectas provenientes de los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y Guanajuato, México (Cuadro 1). Con las nueve poblaciones se formó el dialélico parcial: 1 x 1, 2 x 3, 3 x 4...9 x 9, con un total de 36 cruzas F₁ y F₂.

Cuadro 1. Forma de fruto y procedencia de las colectas de las nueve poblaciones de chile Guajillo en México.

Población	Descripción	Origen
P1	Guajillo Rojo Guajón	Dgo. Zac. y Villa de Reyes SLP
P2	Guajillo Rojo Intermedio	Dgo. Zac. y Villa de Reyes SLP
P3	Guajillo Rojo Chico	Dgo. Zac. y Villa de Reyes SLP
P4	Guajillo Rojo Guajón	San Luis Potosí
P5	Guajillo Rojo Intermedio	San Luis Potosí
P6	Guajillo Rojo Chico	San Luis Potosí
P7	Guajillo Rojo Guajón	Guanajuato
P8	Guajillo Rojo Intermedio	Guanajuato
P9	Guajillo Rojo Chico	Guanajuato

La obtención de semillas F₁ se realizó en 2015 en un invernadero de metal con cubierta plástica en el CP, Campus Montecillo, municipio de Texcoco, Estado de México, ubicado a 19° 20' N, 98° 53' W, a una altitud de 2,250 msnm. La germinación de semillas de cada población

se realizó en charolas de poliestireno, usando como sustrato tierra de monte esterilizada y peat-moss (2:1 v/v).

Las plántulas se trasplantaron 60 días después de la germinación en bolsas de polietileno 40 x 40 cm (12 L) que contenían tezontle rojo con tamaño de partículas de 7 mm. Se utilizó un sistema de riego por goteo fertilizando las plantas con solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1966), con las siguientes concentraciones en mol_c m⁻³ 12.0 NO₃⁻, 1.0 H₂PO₄⁻¹, 7.0 SO₄²⁻, 7.0 K⁺, 9 Ca²⁺ y 4.0 Mg²⁺.

En 2017 se obtuvieron las semillas F₂ de las 36 cruzas y nueve poblaciones; las semillas F₁ fueron germinadas en charolas de plástico de 200 cavidades, como sustrato se usó turba, la germinación se efectuó en invernadero en el Campo Experimental La Huasteca del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado al sur de Tamaulipas, México. Cuando las plántulas alcanzaron una altura de 20 cm se trasplantaron en campo.

2.4.3 Prueba de envejecimiento acelerado (PEA)

La prueba consistió en someter 200 semillas a 42 °C ± 1 100 % de humedad relativa, por 72 h (ISTA, 2010), de las 36 cruzas F₁ y F₂ y sus progenitores. Para realizar la PEA se utilizaron cajas de plástico 10 x 10 x 5 cm, a las que se les agregaron 100 mL de agua destilada, colocando una malla de alambre por encima del nivel de agua como medio de soporte de las semillas y así evitar el contacto de las semillas con el agua. Concluida la PEA, las semillas se sumergieron en una solución a 2 % de hipoclorito de sodio comercial (6 % de ingrediente activo), durante 15 min., y posteriormente se retiró la solución con cloro, se efectuaron cinco enjuagues con agua destilada y las semillas se colocaron en una solución de fungicida Captan[®] (0.6 g L⁻¹); luego las

semillas se evaluaron en una prueba de germinación estándar de acuerdo con las recomendaciones del ISTA (2010).

Se establecieron cuatro repeticiones de 50 semillas por tratamiento distribuidas de acuerdo con un diseño de bloques completos al azar. La germinación de las semillas se efectuó en charolas germinadoras sobre toallas sanitas dobladas, humedecidas con agua destilada. Las semillas se incubaron bajo un fotoperiodo de 16 h, con luz blanca fría fluorescente de 75 W. Las variables longitud de plántula y raíz (cm), peso fresco y seco de plántula con raíz se registraron en diez plantas con competencia completa por unidad experimental, a los 15 días después de establecido el experimento.

2.4.4 Análisis de imágenes en semillas

De las 36 cruzas F_1 y F_2 y los 9 progenitores, se seleccionaron al azar cuatro repeticiones de 100 semillas cada una. La obtención de las imágenes se realizó con un escáner a color marca Epson Stylus® modelo CX5600, distribuyendo las semillas sobre la cama del mismo. Las imágenes obtenidas se procesaron con el programa ImageJ (versión 1.49 b), del National Institutes of Health, Estados Unidos. Las variables obtenidas, de las semillas, fueron largo (mm), ancho (mm), perímetro (mm) y área (mm^2).

2.4.5 Análisis estadístico

El análisis de varianza (ANOVA) para calcular la ACG y ACE se realizó de acuerdo con el Método II de Griffing (1956), usando el programa de computo Diallel-SAS Method II (Zhang y Kang, 2003).

Los componentes de varianzas genéticas se calcularon a partir de los cuadrados medios $\sigma^2_E = \text{CME}$, donde σ^2_E : es la varianza ambiental y CME: es el cuadrado medio del error. Las

varianzas genéticas aditiva y de dominancia se calcularon de acuerdo con Griffing (1956): $\sigma^2_A = 2(\sigma^2_{ACG} - \frac{CMG - MS_E}{(n+2)})$, $\sigma^2_D = \sigma^2_{ACE} = CMS - CME$, donde CMG es el efecto del cuadrado medio de ACG, CMS es el efecto del cuadrado medio de ACE, CME es el cuadrado medio del error y n es el número de progenitores. Los valores de heredabilidad en sentido estrecho se calcularon de acuerdo con Holland *et al.* (2003): $h^2 = \frac{\sigma^2_A}{\sigma^2_P}$, donde σ^2_A es la varianza aditiva y σ^2_P es la varianza fenotípica, calculada como $\sigma^2_A + \sigma^2_D + \sigma^2_E$.

El análisis de correlación con el método de Pearson fue estimado mediante el programa estadístico SAS versión 9.3.

2.5 RESULTADOS

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre genotipos, ACG y ACE para todos los caracteres y generaciones F_1 y F_2 (Cuadro 2). Los cuadrados medios para la ACG fueron de mayor magnitud que los de ACE en las variables área (F_1 y F_2), perímetro (F_2), largo de semilla (F_1 y F_2), ancho de semilla (F_1), longitud de plántula (F_2) y biomasa fresca (F_1 y F_2). Para ACE los cuadrados medios fueron de mayor magnitud que en la ACG, lo que se expresó en las variables longitud de planta (F_1) y longitud de raíz (F_1 y F_2), indicando efectos de acción génica no aditiva en estos caracteres. Los resultados expresan que los progenitores y cruza varían en uno o más caracteres en la calidad física y fisiológica de semillas, y que los caracteres del germoplasma analizado se asociaron más con los efectos aditivos que con los no aditivos, lo que indica que se pueden lograr ganancias satisfactorias con los métodos de selección en estos caracteres. El mayor coeficiente de variación (Cuadro 2) en la calidad física de semilla se observó en el perímetro de semilla tanto para la F_1 , como en la F_2 , y en calidad fisiológica en la longitud de raíz en las dos generaciones.

Las varianzas estimadas de los ocho caracteres evaluados de los nueve progenitores y sus cruza F_1 y F_2 se presentan en el Cuadro 3. Los efectos génicos no aditivos resultaron ser más pronunciados que los efectos génicos aditivos, ya que los valores de la varianza de ACE (σ^2_{ACE}) fueron más altos que los de ACG (σ^2_{ACG}). Estos resultados están respaldados por la proporción de ACG/ACE, que fue menor a 1. En general, la varianza genética de dominancia (σ^2_D) obtuvo valores superiores a la varianza genética aditiva (σ^2_A) en todos los caracteres evaluados en ambas generaciones.

La heredabilidad se estimó en sentido estrecho para los caracteres estudiados. Las estimaciones de heredabilidad fueron de moderadas a bajas, variando de 0.00 a 0.30 (Cuadro

3). El área de la semilla (0.30) y largo de semilla (0.26) obtuvieron el mayor valor de heredabilidad en la calidad física de semillas en F_1 .

Para los caracteres de calidad fisiológica solo la longitud de plántula en F_2 registró una heredabilidad de 0.18. Estos resultados indican la presencia de variabilidad genética en el área y largo de semilla en híbridos F_1 . Los valores bajos de heredabilidad, o cero, indican que los efectos aditivos son de poca importancia, lo cual confirma que los efectos de dominancia son más importantes que los efectos aditivos.

Cuadro 2. Cuadrados medios para características de calidad física y fisiológica de semillas, en generaciones de chile Guajillo.

Caracteres	Bloques				Genotipos				ACG		ACE		C V					
	F ₁	F ₂																
Calidad física																		
Área (mm ²)	0.19	ns	1.74	***	3.78	***	1.41	***	8.89	***	2.20	***	2.64	***	1.24	***	3.5	3.4
Perímetro (mm)	0.36	ns	1.50	**	1.96	***	1.49	***	1.71	***	1.78	***	2.02	***	1.43	***	3.6	3.7
Largo (mm)	0.01	ns	0.05	*	0.07	***	0.04	***	0.15	***	0.06	***	0.05	***	0.04	***	1.3	2.2
Ancho (mm)	0.01	ns	0.00	ns	0.06	***	0.02	***	0.15	***	0.02	***	0.04	***	0.02	***	1.7	1.9
Calidad fisiológica																		
LP (cm)	0.03	ns	0.10	*	0.19	***	0.16	***	0.12	***	0.29	***	0.21	***	0.13	***	4.4	6.2
LR (cm)	0.69	ns	0.19	ns	4.18	***	9.07	***	2.47	*	8.33	***	4.56	***	9.24	***	10.3	12.7
BF (g)	0.01	ns	0.01	ns	0.01	***	0.01	***	0.01	***	0.02	***	0.01	***	0.01	***	7.5	9.3
BS (g)	0.00	ns	0.00	ns	0.00	***	0.01	***	0.00	***	0.01	***	0.00	***	0.01	***	7.7	10.2

*, **, ***: Significativo a 0.05, 0.01, 0.001 respectivamente; ns: no significativo; ACG: aptitud combinatoria general; ACE: aptitud combinatoria específica; CV: coeficiente de variación; LP: Longitud de plántula; LR: Longitud de raíz; BF: Biomasa fresca; BS: Biomasa seca.

Cuadro 3. Estimación de componentes de varianza genética y heredabilidad (h²) para calidad física y fisiológica de semillas de chile Guajillo.

Parámetros	σ^2_E		σ^2_{ACE}		σ^2_{ACG}		σ^2_D		σ^2_A		σ^2_P		h ²		$\sigma^2_{ACG}/\sigma^2_{ACE}$	
	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂
Calidad física																
Área (mm ²)	0.39	0.31	2.25	0.93	0.57	0.09	2.25	0.93	1.14	0.17	3.78	1.41	0.30	0.12	0.25	0.10
Perímetro (mm)	0.35	0.34	1.67	1.09	-0.03	0.03	1.67	1.09	-0.06	0.06	1.96	1.49	0.00	0.04	-0.02	0.03
Largo (mm)	0.004	0.012	0.05	0.028	0.01	0.002	0.046	0.028	0.018	0.004	0.068	0.044	0.26	0.09	0.22	0.07
Ancho (mm)	0.005	0.006	0.15	0.014	0.01	0.00	0.145	0.014	0.02	0.00	0.17	0.02	0.12	0.00	0.07	0.00
Calidad fisiológica																
LP (cm)	0.02	0.03	0.19	0.10	-0.01	0.02	0.19	0.10	-0.016	0.029	0.19	0.16	0.00	0.18	-0.04	0.15
LR (cm)	1.03	1.35	3.53	7.89	-0.19	-0.08	3.53	7.89	-0.38	-0.16	4.18	9.08	0.00	0.00	-0.05	-0.01
BF (g)	0.002	0.003	0.01	0.008	0.00	0.00	0.008	0.008	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
BS (g)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

σ^2_E : varianza del error; σ^2_{ACE} : varianza de la aptitud combinatoria específica; σ^2_{ACG} : varianza de la aptitud combinatoria general; σ^2_D : varianza genética de dominancia; σ^2_A : varianza genética aditiva; σ^2_P : varianza fenotípica; h²: heredabilidad en sentido estrecho; LP: Longitud de plántula; LR: Longitud de raíz; BF: Biomasa fresca; BS: Biomasa seca.

En la presente investigación se detectaron asociaciones significativas ($P \leq 0.05$) entre los caracteres mediante el análisis de correlaciones. Para los cuatro caracteres de calidad física de semilla se reportan altas correlaciones positivas (0.54 a 0.81); mientras, que para longitud de plántula (LP), longitud de raíz (LR) y biomasa fresca (BF) fueron moderadas (0.48 a 0.08). El análisis de correlaciones en la variable biomasa fresca mostró mayor asociación con el tamaño de semilla.

Características físicas y fisiológicas de semillas contrastantes entre los progenitores y cruzas

Con base en los resultados de la prueba de Tukey se observaron diferencias significativas entre los progenitores y las 36 cruzas de cada generación en Chile Guajillo para todas las variables (Cuadro 4 y Cuadro 5). La población siete fue constante con los valores superiores para todos los caracteres de calidad física en ambas generaciones y la población tres para los valores más bajos (Cuadro 4). El mayor valor promedio en la mayoría de las variables, se obtuvo en las cruzas con respecto a los progenitores, excepto para biomasa fresca (P8 en las dos generaciones) y biomasa seca (P6 y P8 en F_1) (Cuadro 5), lo que indica que existe una variabilidad alta entre cruzas y poblaciones en los caracteres estudiados.

Los valores estimados de la aptitud combinatoria general (ACG) para las variables físicas y fisiológicas de semilla se presentan en el Cuadro 6 y Cuadro 7. Para ACG en la calidad física de semillas las poblaciones P7 y P8 presentaron valores positivos en el área, largo y ancho de semilla en F_1 y F_2 , y en P4 para las cuatro variables evaluadas en F_1 , mientras que la población P9 no fue significativa para todas las variables y fue negativa en el área y ancho de semilla (F_1 y F_2) y largo de semilla (F_1) (Cuadro 6).

La ACG en la calidad fisiológica de la población siete fue significativa ($P \geq 0.05$) y positiva para la variable longitud de plántula en las dos generaciones (Cuadro 7). La longitud de raíz presentó cuatro

valores positivos en F₁ y tres en F₂. La ACG en la biomasa seca las poblaciones P1 y P8 fueron significativas ($P \geq 0.01$) y positivas en las dos generaciones.

Cuadro 4. Comparación de medias para caracteres físicos de semillas en las 9 poblaciones y seis cruzas con mayor rendimiento, en dos generaciones (F₁ y F₂) de Chile Guajillo.

Pob. y cruzas	Área (mm ²)		Perímetro (mm)		Largo (mm)		Ancho (mm)	
	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂
Padres								
P1	17.3 b	16.8 a	16.0 c	15.8 a	5.20 c	5.05 a	4.3 c	4.2 a
P2	18.5 a	15.8 d	16.5 b	15.5 b	5.18 d	4.88 b	4.4 b	4.1 a
P3	17.0 c	16.3 b	15.8 c	15.3 b	5.05 g	4.95 b	4.2 e	4.1 a
P4	18.8 a	16.3 b	16.5 b	15.8 a	5.30 a	4.93 b	4.5 a	4.2 a
P5	18.8 a	16.0 b	16.5 b	15.5 b	5.30 a	4.93 b	4.5 a	4.2 a
P6	17.3 b	16.3 b	16.0 c	15.8 a	5.10 e	4.95 b	4.3 c	4.1 a
P7	18.8 a	17.5 a	16.8 b	17.3 a	5.38 a	5.13 a	4.5 a	4.2 a
P8	18.5 a	17.3 a	16.5 b	16.0 a	5.25 b	5.05 a	4.5 a	4.3 a
P9	17.8 b	17.0 a	16.0 c	17.3 a	5.10 e	5.18 a	4.3 c	4.2 a
Cruzas								
	(3 x 8)	(2 x 8)	(1 x 9)	(2 x 9)	(4 x 5)	(2 x 7)	(2 x 4)	(2 x 7)
	19.0 a	18.0 a	18.0 a	16.8 a	5.25 b	5.35 a	4.5 a	4.4 a
	(4 x 7)	(2 x 9)	(2 x 4)	(3 x 4)	(4 x 7)	(2 x 8)	(3 x 8)	(2 x 8)
	20.0 a	17.3 a	18.0 a	16.8 a	5.38 a	5.18 a	4.5 a	4.4 a
	(4 x 8)	(3 x 4)	(4 x 7)	(3 x 5)	(4 x 9)	(2 x 9)	(4 x 7)	(2 x 9)
	18.3 a	17.3 a	17.3 a	15.8 a	5.38 a	5.13 a	4.6 a	4.3 a
	(4 x 9)	(3 x 7)	(4 x 9)	(3 x 8)	(5 x 6)	(3 x 4)	(4 x 9)	(3 x 7)
	20.0 a	17.3 a	17.3 a	16.0 a	5.43 a	5.13 a	4.6 a	4.3 a
	(6 x 8)	(4 x 8)	(5 x 6)	(4 x 8)	(6 x 8)	(3 x 7)	(6 x 8)	(3 x 8)
	18.8 a	17.5 a	18.8 a	17.3 a	5.28 a	5.10 a	4.5 a	4.3 a
	(7 x 8)	(5 x 6)	(7 x 8)	(5 x 6)	(7 x 8)	(5 x 6)	(7 x 8)	(8 x 9)
	20.0 a	17.3 a	17.3 a	16.5 a	5.45 a	5.10 a	4.7 a	4.28 a

Letras distintas en una misma columna indican valores estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Las cruzas están representadas dentro del paréntesis.

Cuadro 5. Comparación de medias para caracteres de calidad fisiológica de semillas en las 9 poblaciones y seis cruzas con mayor rendimiento, en dos generaciones (F₁ y F₂) de Chile Guajillo.

Pob.y cruzas	Longitud de plántula (cm)		Longitud de raíz (cm)		Biomasa fresca (g)		Biomasa seca (g)	
	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂
Padres								
P1	3.11 d	2.77 b	9.84 a	11.14 a	0.66 a	0.69 a	0.07 a	0.07 a
P2	3.51 a	2.80 b	10.85 a	7.11 h	0.71 a	0.52 c	0.06 c	0.07 a
P3	3.49 a	2.88 a	8.86 b	10.23 a	0.66 a	0.46 g	0.07 a	0.06 a
P4	2.96 i	3.18 a	8.98 b	7.80 e	0.65 a	0.60 a	0.06 e	0.05 c
P5	3.58 a	2.70 d	9.93 a	7.17 g	0.71 a	0.49 e	0.06 c	0.05 b
P6	3.22 b	2.65 f	12.38 a	8.83 c	0.69 a	0.55 a	0.08 a	0.06 a
P7	3.43 a	3.03 a	8.84 a	10.72 a	0.60 b	0.68 a	0.05 g	0.06 a
P8	3.28 b	2.89 a	11.21 a	7.85 d	0.76 a	0.59 a	0.08 a	0.06 a
P9	3.24 b	2.95 a	9.83 a	11.81 a	0.68 a	0.62 a	0.06 c	0.06 a
Cruzas								
(1 x 5)	(3 x 4)	(1 x 6)	(2 x 7)	(1 x 4)	(1 x 4)	(1 x 3)	(1 x 2)	
3.54 a	3.21 a	11.37 a	10.72 a	0.72 a	0.62 a	0.07 a	0.07 a	
(1 x 6)	(3 x 8)	(2 x 6)	(3 x 8)	(1 x 6)	(1 x 8)	(1 x 6)	(1 x 8)	
3.55 a	3.26 a	10.66 a	10.78 a	0.75 a	0.64 a	0.07 a	0.07 a	
(2 x 8)	(4 x 5)	(2 x 7)	(4 x 5)	(2 x 6)	(2 x 4)	(2 x 6)	(1 x 9)	
3.61 a	3.24 a	12.33 a	10.64 a	0.72 a	0.63 a	0.07 a	0.07 a	
(4 x 9)	(4 x 8)	(4 x 5)	(5 x 7)	(4 x 9)	(2 x 9)	(2 x 8)	(3 x 5)	
3.73 a	3.19 a	12.38 a	10.84 a	0.75 a	0.65 a	0.07 a	0.07 a	
(6 x 7)	(4 x 9)	(4 x 6)	(6 x 8)	(5 x 8)	(4 x 5)	(3 x 8)	(7 x 9)	
3.57 a	3.37 a	11.12 a	11.59 a	0.71 a	0.67 a	0.07 a	0.07 a	
(7 x 9)	(7 x 9)	(4 x 8)	(7 x 9)	(7 x 9)	(5 x 7)	(5 x 8)	(8 x 9)	
3.55 a	3.28 a	11.38 a	12.43 a	0.71 a	0.66 a	0.07 a	0.07 a	

Letras distintas en una misma columna indican valores estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Las cruzas están representadas dentro del paréntesis.

Los efectos de la ACE de las seis mejores cruzas se presentan en los Cuadros 8 y 9. Las cruzas 1 x 3 y 1 x 9 resultaron significativas ($P \geq 0.001$) para área, perímetro y largo de semilla en F₁, y las cruzas 3 x 4 y 5 x 6 en la F₂ (Cuadro 9).

Las mejores cruzas para la variable longitud de plántula fueron 2 x 8 en F₁ y 1 x 2 en F₂, para la longitud de raíz en 2 x 7 (F₁) y 1 x 9 (F₂), 1 x 6 en biomasa fresca (F₁) 4 x 5 y 5 x 7 (F₂), para la biomasa seca (F₂) la craza 3 x 5 (Cuadro 9). Estos resultados indican que no es necesario seleccionar las mejores cruzas obtenidas de progenitores que tienen un alto efecto de ACG en ambos padres.

Cuadro 6. Aptitud combinatoria general (ACG) en nueve progenitores para variables de calidad física de semillas de chile Guajillo.

Pob.	Área (mm ²)				Perímetro (mm)				Largo (mm)				Ancho (mm)			
	F ₁		F ₂		F ₁		F ₂		F ₁		F ₂		F ₁		F ₂	
P1	-0.67	***	-0.13	ns	-0.32	***	-0.30	***	-0.08	***	-0.02	ns	-0.10	***	-0.02	ns
P2	-0.27	**	-0.09	ns	0.01	ns	-0.05	ns	-0.06	***	0.01	ns	-0.02	*	0.01	ns
P3	-0.36	***	-0.06	ns	-0.26	**	-0.07	ns	-0.06	***	-0.01	ns	-0.04	***	-0.01	ns
P4	0.73	***	0.05	ns	0.31	***	0.09	ns	0.09	***	-0.02	ns	0.09	***	0.00	ns
P5	0.05	ns	-0.24	**	0.20	*	-0.11	ns	0.04	***	-0.05	***	-0.01	ns	-0.02	*
P6	-0.24	**	-0.18	*	0.02	ns	-0.20	**	-0.01	ns	-0.04	**	-0.02	*	-0.02	ns
P7	0.28	**	0.21	**	0.04	ns	-0.30	***	0.04	***	0.05	***	0.05	***	0.01	ns
P8	0.53	***	0.48	***	0.03	ns	0.27	***	0.05	***	0.05	***	0.06	***	0.05	***
P9	-0.06	ns	-0.04	ns	0.04	ns	0.07	ns	-0.01	ns	0.01	ns	-0.01	ns	-0.01	ns

*, **, ***: Significativo a 0.05, 0.01, 0.001, respectivamente; ns: no significativo.

Cuadro 7. Aptitud combinatoria general (ACG) en nueve progenitores para variables de calidad fisiológica de semillas de chile Guajillo.

Pob.	Longitud de plántula (cm)				Longitud de raíz (cm)				Biomasa fresca (g)				Biomasa seca (g)			
	F ₁		F ₂		F ₁		F ₂		F ₁		F ₂		F ₁		F ₂	
P1	-0.05	**	-0.01	ns	-0.06	ns	-0.14	ns	0.01	ns	0.02	*	0.002	**	0.003	**
P2	-0.02	ns	-0.11	***	0.23	ns	-0.18	ns	0.00	ns	0.01	ns	-0.000	ns	0.000	ns
P3	0.00	ns	-0.02	ns	-0.25	ns	0.49	**	-0.03	***	-0.03	***	-0.000	ns	-0.003	***
P4	-0.04	*	0.12	***	-0.05	ns	-0.23	ns	0.01	ns	0.02	*	-0.001	ns	-0.003	***
P5	0.04	*	0.00	ns	0.05	ns	-0.56	***	-0.01	ns	-0.02	**	-0.002	***	0.001	ns
P6	-0.04	ns	-0.13	***	0.40	**	-0.28	ns	0.01	ns	-0.02	**	0.003	***	0.000	ns
P7	0.11	***	0.05	*	-0.31	*	0.61	***	0.01	ns	0.02	**	-0.002	**	-0.001	ns
P8	-0.04	ns	0.06	*	0.17	ns	-0.28	ns	0.03	***	0.00	ns	0.004	***	0.002	**
P9	0.02	ns	0.03	ns	-0.18	ns	0.57	***	0.00	ns	0.00	ns	-0.002	***	0.001	ns

*, **, ***: Significativo a 0.05, 0.01, 0.001, respectivamente; ns: no significativo.

Cuadro 8. Aptitud combinatoria específica de 6 cruzas sobresalientes de Chile Guajillo para variables de calidad fisiológica de semillas de un total de 45 cruzas F₁ y F₂.

Área (mm ²)		Perímetro (mm)		Largo (mm)		Ancho (mm)	
F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂
(1x3) 1.01 ***	(1x2) 0.67 **	(1x3) 0.52 *	(2x9) 0.62 *	(1x3) 0.12 ***	(1x2) 0.08 ns	(1x4) 0.06 ns	(1x3) 0.15 ***
(1x9) 1.30 ***	(2x7) 0.33 ns	(1x9) 2.32 ***	(3x4) 0.88 ***	(1x9) 0.22 ***	(2x3) 0.07 ns	(2x7) 0.15 ***	(1x9) 0.18 ***
(3x8) 1.06 ***	(2x8) 1.06 ***	(2x4) 1.39 ***	(3x7) 0.67 *	(4x9) 0.12 ***	(2x7) 0.28 ***	(2x8) 0.11 **	(3x8) 0.11 ***
(4x7) 1.22 ***	(3x4) 0.72 **	(4x7) 0.59 **	(4x8) 1.04 ***	(5x6) 0.24 ***	(2x8) 0.10 *	(3x4) 0.05 ns	(4x7) 0.11 ***
(4x9) 1.07 ***	(3x7) 0.56 *	(5x6) 2.23 ***	(5x6) 0.97 ***	(5x9) 0.15 ***	(3x4) 0.15 **	(3x7) 0.07 ns	(5x9) 0.17 ***
(5x9) 1.62 ***	(5x6) 1.13 ***	(7x8) 0.93 ***	(5x8) 0.74 **	(7x8) 0.21 ***	(5x6) 0.19 ***	(5x6) 0.03 **	(7x8) 0.17 ***

*, **, ***: Significativo a 0.05, 0.01, 0.001, respectivamente; ns: no significativo.

Cuadro 9. Aptitud combinatoria específica de 6 cruzas sobresalientes de Chile Guajillo para variables de calidad fisiológica de semillas de un total de 45 cruzas F₁ y F₂.

Longitud de plántula (cm)		Longitud de raíz (cm)		Biomasa fresca (g)		Biomasa seca (g)	
F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂
(1 x5) 0.25 ***	(1x2) 0.29 ***	(1x6) 1.18**	(1x9) 3.09 ***	(1x4) 0.04 *	(1x8) 0.04 ns	(1x3) 0.01 ***	(1x9) 0.009 **
(1x6) 0.34 ***	(1x6) 0.22 **	(2x7) 2.57 ***	(2x4) 1.63 **	(1x6) 0.08 ***	(1x9) 0.06 *	(2x6) 0.01 ***	(3x5) 0.010 ***
(2x8) 0.37 ***	(2x5) 0.24 **	(3x8) 0.80 ns	(4x5) 2.25 ***	(2x6) 0.05 *	(2x3) 0.05 *	(3x9) 0.01 ***	(3x8) 0.005 ns
(4x6) 0.31 ***	(3x8) 0.24 **	(4x5) 2.54 ***	(4x8) 1.92 ***	(3x9) 0.04 ns	(4x5) 0.09 ***	(4x5) 0.01 ***	(4x6) 0.006 *
(5x9) 0.25 ***	(5x6) 0.26 **	(4x6) 0.93 *	(6x8) 2.97 ***	(4x9) 0.07 **	(5x7) 0.09 ***	(5x8) 0.01 ***	(7x9) 0.003 **
(8x9) 0.24 **	(6x8) 0.28 ***	(4x8) 1.42 **	(7x9) 2.38 ***	(5x9) 0.04 ns	(7x9) 0.06 *	(5x9) 0.01 ***	(8x9) 0.006 ns

*, **, ***: Significativo a 0.05, 0.01, 0.001, respectivamente; ns: no significativo.

Aunque se observó una ACE significativa ($P \geq 0.01$) para todas las variables, no se encontró ninguna craza que tuviera una ACE significativa ($P \geq 0.01$) en todas las variables estudiadas

2.6 DISCUSIÓN

Mediante los experimentos realizados en la presente investigación se lograron los siguientes resultados: a) Los efectos genéticos no aditivos predominan en la calidad de semilla de chile Guajillo, b) Cruzas con valores superiores de ACE no necesariamente se derivan de progenitores con buena ACG: mismos que se discuten a continuación.

a) Efectos genéticos no aditivos predominan en la calidad de semilla de chile Guajillo. En las cruas dialélicas entre las nueve poblaciones de este tipo de chile, la acción génica no aditiva tuvo un papel predominante en la expresión de la mayoría de las variables estudiadas, de ambas generaciones, ya que las varianzas genéticas de ACE fueron mayores que las varianzas de la ACG en las generaciones F₁ y F₂. Asimismo, relaciona la hibridación a partir de la selección de cruas superiores, como el procedimiento para obtener variedades superiores en chile Guajillo. La importancia de la acción génica aditiva y no aditiva fue reportada por Do Nascimento *et al.* (2014), destacando que los efectos de ACG son más importantes que los de ACE para las variables de rendimiento de frutos, fenológicos y bioquímicos en *Capsicum annuum*: mientras que Nagaraju y Sreelathakumary (2016) reportaron que los efectos genéticos no aditivos fueron más importantes que los efectos genéticos aditivos y que las magnitudes de los efectos de ACG y ACE son indicativos de la importancia relativa de las acciones génicas aditiva y no aditiva en la herencia de un carácter. Respecto al efecto aditivo significativo reportado en esta investigación, indica que se puede adquirir un aumento o disminución efectivo en estas variables a través de generaciones sucesivas de retrocruas y selección de recombinantes deseados de aquellas poblaciones segregantes, aumentando así la frecuencia de alelos favorables para estas variables (Do Rêgo *et al.*, 2009).

La heredabilidad es un parámetro genético importante para calcular la ganancia esperada por selección. En esta investigación, las estimaciones de heredabilidad en sentido estrecho variaron de nulas

a moderadas, lo que indica que la acción génica no aditiva parece ser más importante en la herencia del área y largo de semilla. Por lo tanto, la selección será más efectiva en el tamaño de la semilla que en el vigor de plántula, ya que el área y largo de semilla mostraron mayor heredabilidad. Pahlavani *et al.* (2012) consideran una alta heredabilidad en sentido estrecho para el número de semillas por planta en cártamo, mientras que Pandit y Adhikary (2014) reportan una alta heredabilidad para el peso de 1000 semillas y fruto en chile (*Capsicum annuum* L.).

b) Cruzas con valores altos de ACE y ACG

La estimación de los efectos de ACG en los genotipos parentales para características de importancia agrícola puede guiar a la selección de genotipos de chile Guajillo. En el género *Capsicum* se han reportado efectos significativos de ACG para el rendimiento de fruto por planta (Nagaraju y Sreelathakumary, 2016; Sitaresmi *et al.*, 2010; Do Nascimento *et al.*, 2014; Devi *et al.*, 2018), longitud de fruto y número de semillas por fruto (Singh *et al.*, 2014). La calidad física de semillas mostró una magnitud más amplia en los efectos de la ACG que el vigor de plántula, el análisis de la aptitud combinatoria reveló que ningún progenitor exhibió efectos de ACG para todos los caracteres estudiados. Sin embargo, algunos progenitores mostraron fuertes efectos de ACG para la mayoría de los caracteres, sugiriendo que las poblaciones P7 y P8 pueden ser utilizados como padres donantes importantes en un programa de mejoramiento genético selectivo para mejorar la calidad física y fisiológica de la semilla.

Respecto a los resultados de ACE, podemos concluir que algunas de las mejores cruzas resultaron de cruzar un padre con efectos altos con uno de bajo o negativo efecto de ACG. El comportamiento de cruzas con efectos positivos significativos de ACE que involucran combinaciones de progenitores de ACG bajos con bajos o bajos con altos, puede atribuirse a la presencia de interacciones no alélicas (Singh *et al.*, 2014), los bajos efectos de ACE mostrados por híbridos derivados de padres con altos efectos de ACG puede atribuirse a la acción genética complementaria (Kumari *et al.*, 2015).

Esta investigación es importante para el mejoramiento genético en Chile Guajillo, debido a que sienta las bases que permite disponer de información valiosa sobre el potencial genético en genotipos de este tipo de Chile, es decir, germoplasma que reúna al mismo tiempo, caracteres de calidad física y fisiológica, y caracteres agronómicos sobresalientes, que puede ser incorporado en programas de mejoramiento genético, basados en cruces dialélicas.

2.7 CONCLUSIONES

La acción génica no aditiva fue más importante que la acción génica aditiva en todos los caracteres de calidad de semilla estudiados. Los progenitores utilizados en esta investigación tienen ACG aceptable para la mayoría de los caracteres, cruces con valores superiores de ACE no necesariamente se derivan de progenitores con valores aceptables de ACG.

Agradecimientos: Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada a FHM y financiamiento para la realización de este estudio. Al Dr. Higinio López Sánchez, por las sugerencias y comentarios.

2.8 BIBLIOGRAFÍA

- Bhutia N D, T Seth, V D Shende, S Dutta and A Chattopadhyay (2015)** Estimation of heterosis, dominance effect and genetic control of fresh fruit yield, quality and leaf curl disease severity traits of chilli pepper (*Capsicum annum* L.). *Scientia Horticulturae* 182:47-55, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.017>
- de la Torre M V, y C A Biasutti (2015)** Efectos recíprocos y aptitud combinatoria en caracteres relacionados al vigor temprano y al rendimiento en grano en maíz. *Agriscientia* 32(1):41-53, http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1668-298X2015000100004.
- Devi M B, N K Pathania and N Thakur (2018)** Estimation of genetic variability, GCA and SCA effects for development of early and high yielding bell pepper hybrids suitable for protected cultivation. *Journal of Applied and Natural Science* 10(1):410-416, <https://doi.org/10.31018/jans.v10i1.1639>
- Do Nascimento N F F, E R Do Rêgo, M F Nascimento, C H Bruckner, F L Finger and M M Do Rêgo (2014)** Combining ability for yield and fruit quality in the pepper *Capsicum annum*. *Genetics and Molecular Research* 13(2):3237-3249, <http://dx.doi.org/10.4238/2014.April.29.2>
- Do Rêgo E R, M M Do Rêgo, F L Finger, C D Cruz and V W D Casali (2009)** A diallel study of yield components and fruit quality in chilli pepper (*Capsicum baccatum*). *Euphytica* 168: 275-287, <http://dx.doi.org/10.1007/s10681-009-9947-y>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (2018a)** Cultivos. Mundo. Producción, cantidad. Chiles, pimientos picantes, pimientos (verdes). 2016. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Página consultada 10/01/2019)
- FAO, Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (2018b)** Semillas. <http://www.fao.org/seeds/es/>. (Página consultada 10/01/2019)
- Gami R A and R M Chauhan (2013)** Heterosis and combining ability analysis for seed yield and its attributes in Indian mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern and Coss]. *Indian Journal of Agricultural Research* 47(6):535-539.
- González-Torres A, J G Luna-Ortega, M A Gallegos-Robles, J L García-Hernández, P Preciado-Rangel, C Guerrero-Guerrero y M García-Carrillo (2017)** Aptitud combinatoria y heterosis en híbridos de líneas endogámicas de maíz. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 4(11):223-232, <http://dx.doi.org/10.19136/era.a4n11.930>.
- Griffing B (1956)** Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian journal of biological sciences* 9(4): 463-493.
- Goggi A S, P Caragea, L Pollak, G McAndrews, M DeVries and K Montgomery (2008)** Seed quality assurance in maize breeding programs: Tests to explain variations in maize inbreds and populations. *Agronomy Journal* 100(2):337-343, Doi: 10.2134/agrojn12007.0151.
- Holland J B, W E Nyquist and C T Cervantes-Martínez (2003)** Estimating and interpreting heritability for plant breeding: an update. *Plant Breeding Reviews* 22:9-112, <http://www4.ncsu.edu/~jholland/Pubs/Heritability.pdf>
- International Seed Testing Association (ISTA). (2010)** International rules for seed testing. Zurich.
- Kumari J, H K Dikshit, B Singh and D Singh (2015)** Combining ability and character association of agronomic and biochemical traits in pea (*Pisum sativum* L.). *Scientia Horticulturae* 181: 26-33, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.051>
- León-Velasco H, L E Mendoza-Onofre, F Castillo-González, T Cervantes-Santana y A Martínez-Garza (2009)** Evaluación de dos generaciones de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. II: Aptitud combinatoria, heterosis y heterobeltiosis. *Agrociencia* 43(6): 609-623.

- Manjarrez S M, A F Palemón, M N O. Gómez, C A Espinosa, H S A Rodríguez, N A Damián, C E Hernández and L B Cruz (2014)** Aptitud combinatoria general y específica de maíces normales y de alta calidad de proteína. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 5(7):1261-1273, <http://www.redalyc.org/html/2631/263131533010/>.
- Mastebroek H D, E N van Loo and O Dolstra (2002)** Combining ability for seed yield traits of *Chenopodium* quinoa breeding lines. *Euphytica* 125(3): 427, <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1016030129541>
- Moterle L M, A D L Braccini, C A Scapim, R J B. Pinto, L S A Gonçalves, R Rodrigues and A T do Amaral Júnior (2012)** Combining ability of popcorn lines for seed quality and agronomic traits. *Euphytica* 185(3): 337-347, <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0458-2>
- Nagaraju M M and I Sreelathakumary (2016)** Combining ability analysis for growth and yield characters in chilli (*Capsicum annuum* L.). *International Journal of Farm Sciences* 6(4): 207-212.
- Pahlavani M H, G Saeidi and A F Mirlohi (2012)** Genetic analysis of seed yield and oil content in safflower using F1 and F2 progenies of diallel crosses. *International Journal of Plant Production* 1(2): 129-140, http://ijpp.gau.ac.ir/article_530_746573241d2048d6c44940fee70e9019.pdf
- Pandit M K and S Adhikary (2014)** Variability and heritability estimates in some reproductive characters and yield in chilli (*Capsicum annuum* L.). *International Journal of Plant & Soil Science* 3(7): 845-853, <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2014/7236>
- Saeed F, M H N Tahir, S A Kang, M Riaz, J Farooq and M Saeed (2013)** Heterosis and combining ability for seed yield and its components in *Brassica juncea* L. *Albanian Journal of Agricultural Sciences* 12(2): 203, https://www.researchgate.net/profile/Shehzad_Ahmad_Kang/publication/273440283.
- SAS Institute (2012)** SAS system for windows. Release 9.3. SAS Institute Inc, Cary
- Silva C P D, A A Teixeira, V A Pio, V H Duarte, F I L de Jesus, C Vittorazzi and M Vivas (2015)** Combining ability between tropical and temperate popcorn lines for seed quality and agronomic traits. *Australian Journal of Crop Science* 9(4): 256-263, http://www.cropj.com/cabral_9_4_2015_256_263.pdf.
- Singh P, D S Cheema, M S Dhaliwal and N Garg (2014)** Heterosis and combining ability for earliness, plant growth, yield and fruit attributes in hot pepper (*Capsicum annuum* L.) involving genetic and cytoplasmic-genetic male sterile lines. *Scientia Horticulturae* 168: 175-188, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.031>.
- Sitairesmi T., S. Sujiprihati and M Syukur (2010)** Combining ability of several introduced and local chilli pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes and heterosis of the offsprings. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)* 38(3):212-217, <http://pkht.ipb.ac.id/wp-content/uploads/2015/11/2010-61.pdf>.
- Sprague G F and L A Tatum (1942)** General vs. Specific Combining Ability in Single Crosses of Corn 1. *Agronomy Journal* 34(10): 923-932.
- Steiner A A (1966)** The influence of the chemical composition of a nutrient solution on the production of tomato plants. *Plant Soil* 24: 454-466, <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/308601>.
- Sulewska H, K. Śmiatacz, G Szymańska, K Panasiewicz, H Bandurska and R Głowicka-Wołoszyn (2014)** Seed size effect on yield quantity and quality of maize (*Zea mays* L.) cultivated in South East Baltic region. *Zemdirbyste-Agriculture* 101(1):35-40, <https://doi.org/10.13080/z-a.2014.101.005>.

- Ushakumari R, N Vairam, C R Anandakumar and N Malini (2010)** Studies on hybrid vigour and combining ability for seed yield and contributing characters in cowpea (*Vigna unguiculata*). *Electronic Journal of Plant Breeding Coimbatore* 1(4): 940-947, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.177.6245&rep=rep1&type=pdf>.
- Vekariya R D, S Nimbale, A Batheja, R S Sangwan and S Mandhania (2017)** Research Article Combining ability and gene action studies on seed cotton yield and its related traits in diploid cotton (*Gossypium arboreum* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding* 8(4):1159-1168, <https://doi.org/10.5958/0975-928X.2017.00168.5>.
- Zhang Y and M S Kang (2003)** DIALLEL-SAS: a program for Griffing's diallel methods. In: Kang MS (ed) Handbook of formulas and software for plant geneticists and breeders. *Food Products Press, New York*, pp. 1-19.

CAPÍTULO III. PARÁMETROS GENÉTICOS DE CARACTERES FITOQUÍMICOS EN CHILE GUAJILLO (*Capsicum annuum* L.)

Fanny Hernández Mendoza¹, Tarsicio Corona Torres^{1*}, Víctor Heber Aguilar Rincón¹, Fernando Gómez Merino², Aquiles Carballo Carballo ¹, Gabino García de los Santos¹, Salvador Miranda Colin¹, and Irma Sánchez Cabrera¹.

3.1 RESUMEN

La diversidad genética está presente en el género *Capsicum* por el tamaño, forma, color, sabor e inclusive concentraciones de diferentes fitoquímicos. Nuestro objetivo en este estudio fue identificar poblaciones con alta aptitud combinatoria general (ACG) y cruzas con alta aptitud combinatoria específica (ACE) en características fitoquímicas en la calidad del fruto. La determinación de los parámetros de color L^* c^* h° se realizó con un espectrofotómetro, la cuantificación de flavonoides y carotenoides totales se determinó con métodos colorimétricos, y por último la cuantificación de capsaicinoides fue mediante cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC). Los resultados en caracteres de color presentaron diferencias significativas entre cruzas y poblaciones, siendo los frutos secos los que presentaron una coloración mas intensa y con menor brillo, sin embargo, la ACG solo presenta significancia en c^* . La mayor acumulación de carotenoides fue en la crusa P5 x P9 (164.29 mg por 100 g MS), y en flavonoides fue la crusa P7 x P9 (89.1 mg por 100 g MS) con un aumento del 176 % y 296 % con respecto a sus poblaciones. La ACG más alta para carotenoides y flavonoides fue para P5 y la ACE en la crusa P7 x P9. La acumulación de capsaicinoides y ACG fue mayor en el progenitor 2 (13381 SHU). La alta concentración de capsaicinoides, flavonoides y carotenoides en este tipo de chile, los hace idóneos para utilizarlos en programas de mejoramiento genético.

Palabras clave: Capsaicinoides, carotenoides, flavonoides, color.

GENETIC PARAMETERS OF PHYTOCHEMICAL CHARACTERS IN PEPPER

GUAJILLO (*Capsicum annuum* L.)

3.2 ABSTRACT

Genetic diversity is present in the genus *Capsicum* due to the size, shape, color, flavor and even concentrations of different phytochemicals. Our objective in this study was to identify populations with high general combining ability (GCA) and crosses with specific combining ability (SCA) in phytochemical characteristics in fruit quality. The determination of the color parameters $L^* a^* b^*$ was made with a spectrophotometer, the quantification of flavonoids and total carotenoids was determined with colorimetric methods, and finally the quantification of capsaicinoids was by high performance liquid chromatography (HPLC). The results in the measurement of the color parameters showed significant differences between crosses and parents, with the dry fruits having the most intense coloration and with less brightness, however, the GCA only shows significance in a^* . The highest carotenoid accumulation was in the P5 x P9 cross (164.29 mg per 100 g DM), and in the flavonoids it was the P7 x P9 cross (89.1 mg per 100 g DM) with an increase of 176% and 296% with respect to their progenitors. The highest GCA for carotenoids and flavonoids was for P5 and SCA at the cross P7 x P9. The accumulation of capsaicinoids and ACG was greater in progenitor P2 (13381 SHU). The high concentration of capsaicinoids, flavonoids and carotenoids in this type of chili, makes them ideal for use in breeding programs.

Key words: Capsaicinoids, carotenoids, flavonoids, color.

3.3 INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum* spp.) utilizado en seco es un condimento importante en la gastronomía alrededor del mundo, ya que aporta sabor, color, picor y aroma a los platillos (Barceloux, 2009). La producción de chile seco en México en 2017 fue de 61,365 toneladas (FAO, 2019).

El picor, un atributo importante del chile como condimento, se debe a la presencia de complejos químicos o alcaloides conocidos como capsaicinoides (Perucka y Materska, 2001; Naresh *et al.*, 2012), la capsaicina y la dihidrocapsaicina constituyen cerca del 90 % de los capsaicinoides totales en el fruto (Giuffrida *et al.*, 2013). El contenido de capsaicina es uno de los principales caracteres de calidad que determinan los fitomejoradores, mientras desarrollan variedades de *Capsicum* (Hachiya *et al.*, 2007).

Los pigmentos del fruto están asociados con el color, la nutrición y el sabor del fruto, el color del fruto en chile es importante para el fitomejorador y el consumidor.

El color de los frutos maduros depende de la presencia de flavonoides y carotenoides, pigmentos que se componen, principalmente de capsantina y capsorrubina para frutos rojos (Guzmán *et al.*, 2011), ambos compuestos son fuente de antioxidantes benéficos para la salud humana, como la reducción del riesgo de enfermedades crónicas, diversos tipos de cáncer, antiinflamatorios y analgésicos (Rao y Rao, 2007; Guzmán *et al.*, 2011; Bosland and Votava 2012; Rodríguez-Burruezo *et al.*, 2012 Hernández- Ortega *et al.*, 2012).

El conocimiento sobre la acción de los genes y la herencia de los caracteres ayuda en la selección de los padres en un programa de mejoramiento (acquaah 2012). Por lo tanto,

para obtener poblaciones con genes deseables, es necesario conocer la aptitud combinatoria de los padres seleccionados, los cuales se utilizarán en un programa de mejoramiento.

Sprague y Tatum (1942), introdujeron los términos de la Aptitud combinatoria general y aptitud combinatoria específica. La ACG corresponde al comportamiento promedio de una línea en diversas combinaciones híbridas y la aptitud combinatoria específica (ACE) a las combinaciones específicas con respecto a la ACG de sus padres. El objetivo de esta investigación fue evaluar la aptitud combinatoria de capsaicinoides, flavonoides, carotenoides y color e identificar poblaciones con una buena ACG para estos caracteres.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Material vegetal

Se utilizaron nueve poblaciones de chile Guajillo (Cuadro 1), las que se establecieron bajo condiciones de invernadero en 2015, en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México. Con las nueve poblaciones se formó un dialélico parcial obteniendo 36 cruzas.

Cuadro 1. Forma de fruto y procedencia de las colectas de las nueve poblaciones de chile Guajillo en México.

Población	Descripción	Origen
1	Guajillo Rojo Guajón	Dgo. Zac. y Villa de Reyes SLP
2	Guajillo Rojo Intermedio	Dgo. Zac. y Villa de Reyes SLP
3	Guajillo Rojo Chico	Dgo. Zac. y Villa de Reyes SLP
4	Guajillo Rojo Guajón	San Luis Potosí
5	Guajillo Rojo Intermedio	San Luis Potosí
6	Guajillo Rojo Chico	San Luis Potosí
7	Guajillo Rojo Guajón	Guanajuato
8	Guajillo Rojo Intermedio	Guanajuato
9	Guajillo Rojo Chico	Guanajuato

3.4.2 Evaluación de las poblaciones y F₁

Las 36 cruzas y las nueve poblaciones se establecieron en el Campo Experimental las Huastecas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) al sur de Tamaulipas, México en el 2017. El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar el cual consistió de dos surcos con cuatro plantas por surco y cuatro repeticiones de cada una de las 36 cruzas y sus nueve poblaciones, la unidad experimental estuvo representada por una parcela útil de 1.84 m² (dos surcos de 2 m de longitud por 0.92 cm de ancho).

De cada parcela experimental se tomaron doce frutos maduros (color rojo) del estrato medio, de las cuatro plantas centrales, los frutos se secaron a la sombra sobre mesas de laboratorio durante 15 días. Las muestras de cada población se molieron con semilla en un molino marca Krups modelo GX410011 y el polvo se mantuvo en un lugar fresco, seco y en ausencia de luz hasta su uso.

3.4.3 Medición de parámetros de color

Para la medición del color del pericarpio se tomaron 12 frutos frescos, y luego esos mismos frutos en seco, de cada población y cruza, para la evaluación de luminosidad (L^*), ángulo de matiz (h°) e índice de pureza o cromaticidad del color (croma) mediante un espectrofotómetro MiniScan® EZ 4500L marca HunterLab (Hunter Associates Laboratory Inc., Reston, VA) provisto con una fuente de iluminación D65, la cual incidirá sobre la muestra a 45° y el observador a 0° . Las variables se estimaron con las siguientes ecuaciones: $Hue = \tan^{-1}(b/a)$; $Croma = (a^2 + b^2)^{1/2}$ (McGuire, 1992).

3.4.4 Medición de carotenoides totales

Se utilizó el método de Nagata y Yamashita (1992), empleando 0.5 g como muestra. Las muestras se colocaron en tubos tipo Falcon, adicionando 10 mL de acetona: hexano en proporción 4:6 (v/v), agitándose por 1 min, se tomaron 200 μ L del sobrenadante por duplicado, colocándolas en una microplaca de 96 pozos. La absorbancia de la fase orgánica se midió a 450 nm en un espectrofotómetro GO Multiskan® FC (Thermo Scientific, Waltham, Massachusetts, USA). Se utilizó hexano como solución en blanco. Para calcular la concentración (μ g) de carotenoides totales, se utilizó la siguiente ecuación: $\mu g = A \times V \text{ (mL)} \times 106 / \epsilon \times 100$; donde ϵ = coeficiente de extinción de β -carotenoide (2340); V = volumen de

muestra; A = Absorción obtenida. Los resultados se expresan finalmente en mg por 100 g de materia seca de carotenoides totales.

3.4.5 Medición de flavonoides totales

Se determinaron con el método colorimétrico de cloruro de aluminio propuesto por Chang *et al.* (2002), modificado por Meneses-Reyes *et al.* (2008).

Se pesaron 0.25 g de cada muestra colocándolas en tubos de ensaye de fondo plano, se adicionaron 500 μ L de metanol al 80 % y se incubaron en baño María a 70 °C por una hora, centrifugándolos después a 731 xg durante 13 min en una centrífuga. Del sobrenadante se obtuvieron alícuotas de 150 μ L, a las que se agregaron 37 μ L de metanol al 80 %; de la mezcla anterior se tomó una alícuota de 50 μ L a la que se le adicionaran 100 μ L de cloruro de aluminio, se aforó a 5 mL con metanol al 80 %. Las muestras permanecieron 40 min en oscuridad y se tomaron 200 μ L por duplicado de cada muestra en una microplaca, la absorbancia de las muestras se leyó a 415 nm en un espectrofotómetro (Multiskan® FC Thermo Scientific, Waltham, MA, USA). Los resultados se reportarán en mg de flavonoides totales por 100 g de materia seca (MS).

3.4.6 Medición de capsaicinoides

Se pesaron 0.5 g de chile en polvo por muestra, para realizar la extracción, colocando en un tubo tipo Falcon (10 mL) de cada muestra, adicionando 5 mL de acetonitrilo grado HPLC. Los tubos se taparon y colocaron en baño María a 60 °C durante cinco horas, agitándolos cada 30 min. Posteriormente se enfriaron las muestras conservándolas a temperatura ambiente durante 12 h en oscuridad. Se filtraron 2 mL de sobrenadante con

acrodiscos de celulosa (Millipore[®], 25 mm de diámetro, poro de 0.45 µm), se conservaron en tubos eppendorf en refrigeración hasta su análisis.

La cuantificación de los dos principales capsaicinoides (Dihidro- y capsaicina), mediante cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) en un cromatógrafo Agilent[®] mod. 1100 equipado con un detector UV-Visible y una columna C18 (150x4.6 mm D.I; partículas de 5 µm). La concentración de cada capsaicinoide en unidades de picor Scoville (SHU, scoville heat units) se calculó con las ecuaciones del método 995.03 propuesto por la Association of Official Analytical Chemists (AOAC International, 1998).

$$C = (Pc/Ps) \times (Cs/Wt) \times (10/0.89) \times 16100$$

$$D = (Pd/Ps) \times (Cs/Wt) \times (10/0.93) \times 16100$$

donde, C=capsaicina (SHU); D=dihidrocapsaicina (SHU); Pc, Pd=área del pico para, capsaicina y dihidrocapsaicina; Ps=área del pico del estándar correspondiente; Cs=concentración de la solución del estándar (mg mL⁻¹); Wt=peso de la muestra (g). Los capsaicinoides totales se calcularon como la suma de cada uno de estos compuestos (C+D=capsaicinoides totales).

Antes del análisis de las muestras se construyeron dos curvas de calibración (R² 0.99) con estándares externos de capsaicina (Cap) (8-methyl-n-vanillyl-6-nonenamide) y dihidrocapsaicina (DH) (8-methyl-n-vanillyl-nonanamide) (Natural Capsaicin[®], Sigma). El tiempo de retención fue en 10.45 min para capsaicina 15.40 min para dihidrocapsaicina. Ya construida la curva de calibración se inyectaron 20 µL de cada muestra, con tres repeticiones. El tiempo de análisis será de 18 min. La fase móvil consistirá de acetonitrilo: agua en una

proporción de 45:55 (v/v) y un flujo isocrático de 1.5 mL min^{-1} a temperatura ambiente. La corrida se hizo a una longitud de onda de 280nm.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de los datos experimentales y las medias fueron comparadas por la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) se calcularon siguiendo el método 2 del dialélico de Griffing (Griffing, 1956). Con el programa DIALLEL-SAS (Zhang, 2003), con el paquete estadístico SAS ver. 9.3.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas ($p \leq 0.0001$) para las poblaciones y sus cruzas, así como en los efectos de ACE, mientras que ACG no presentó diferencias significativas tanto en fruto fresco como en seco en luminosidad y h° (Cuadro 2) por efecto de los materiales genéticos (progenitores y sus 36 cruzas) en todas las variables evaluadas (Cuadro 2). La importancia de los cuadrados medios entre los genotipos para todos los caracteres evaluados indicó la presencia de una amplia variabilidad genética entre las cruzas y en la mayoría de los caracteres de las poblaciones, excepto en luminosidad y h° para frutos frescos y secos.

Los efectos significativos de ACG y ACE indica la importancia de las acciones genéticas aditivas y no aditivas respectivamente (Cuadro 2). Los cuadrados medios para la ACG fueron de mayor magnitud que los de ACE en las variables carotenoides y en Cromo en frutos maduros, lo que indica que estas dos variables su acción génica es de aditividad, mientras que la mayoría de los caracteres son de efectos génicos no aditivos (acción génica dominante) por presentar mayor magnitud en ACE.

3.5.1 Comparación de medias

El análisis de comparación de medias detectó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre las poblaciones y cruzas para todas las variables evaluadas (Cuadro 3 y 4), lo que aún afirma más la evidencia de una amplia diversidad genética entre materiales genéticos evaluados, la cual puede deberse a la constitución genética y origen geográfico diferente. El contenido de capsaicina fue mayor a la dihidrocapsaicina en todos los materiales, la concentración de

capsaicinas en las poblaciones tiene un intervalo de 1829 unidades Scoville (SHU) en P5 a 8777 SHU en P2.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para características fitoquímicas y color, en poblaciones de Chile Guajillo.

Variables evaluadas	Repetición	Pob. y Cruza	ACG	ACE	CV (%)
gl	3	44	8	36	
Capsaicina	26251	6617152 ***	4280048 ***	7136508 ***	18.5
Dihidrocapsaicina	7224	1821013 ***	1177852 ***	1963938 ***	18.5
Capsaicinoides totales	475225	36106751 ***	22486103 ***	39133562 ***	18.1
Carotenoides	2574.09 ***	1778.91 ***	1781.34 ***	1778.37 ***	7.09
Flavonoides	38.2	682.7 ***	243.4 ***	780.3 ***	9.3
Fruto maduro					
Luminosidad	12.2	19.9 ***	6.3	22.9 ***	9.8
Croma	39.7 *	59.0 ***	80.9 ***	54.2 ***	10.8
Hue (°)	6.44	25.4 **	11	28.6 **	13.8
Fruto seco					
Luminosidad	11.5	24.2 **	11.4	27.1 **	15.9
Croma	18.3	52.2 ***	32.9 ***	56.5 ***	2.7
Hue (°)	5.3	7.9 ***	4.8	8.6 ***	8.7

*, **, ***: Significativo a 0.05, 0.01, 0.001 respectivamente; ns: no significativo; Pob.: Población; ACG: aptitud combinatoria general; ACE: aptitud combinatoria específica; CV: coeficiente de variación.

Los contenidos de capsaicinoides totales en el fruto de Chile Guajillo fluctuaron ampliamente entre poblaciones, de 2789 en P5 a 13381 SHU en el P2. El picor de las nueve poblaciones evaluadas expresó el siguiente orden: 2>4 >3 >8 >7 >1 >6 >9>5. La cruza 1 x 9 (8432.3) presentó la mayor concentración de Cap., DH y Cap. total, a pesar de que sus dos poblaciones no representan concentraciones altas (Cuadro 3).

Para el caso de carotenoides, la cruza P5 x P6 presenta el valor más alto con respecto a las cruzas de mejor rendimiento, con una concentración de 120.5 mg por 100 g de materia seca, la población P8 (159.79) obtuvo la mayor concentración entre los progenitores (Cuadro 3)

Con respecto a los flavonoides la cruce P7 x P9 fue superior con respecto a las cruces y poblaciones evaluadas con 89.1 mg por 100 g de materia seca, P1 fue el de menor concentración (21.4) (Cuadro 3)

Los valores de h° indican que todos los materiales tienen frutos con tonos de color rojo, sin embargo, la saturación del color (croma) disminuyó en los frutos secos proporcionando un color rojo más intenso (Cuadro 4). La cruce P2 x P 6 tuvo el valor más bajo para el carácter h° en frutos maduros (23.7), lo que indica que es la más roja (Cuadro 4).

El conocer la aptitud combinatoria proporciona saber que padres son apropiados en programas de mejoramiento de hibridación, ya que da una idea de si un padre en particular combina bien en alguna cruce y también si este supera algún carácter contra los resultados de la aptitud combinatoria general de los progenitores (Do Rêgo *et al.*, 2009).

Los efectos de aptitud combinatoria general y específica para los caracteres de capsaicinoides, flavonoides y carotenoides se presentan en el Cuadro 5. Las poblaciones P2 y P7 presentaron los valores positivos más altos para los caracteres de capsaicina, dihidrocapsaicina y el total de capsaicinoides, lo que les atribuye ser las más apropiadas para contribuir al mayor picor del fruto, P2 es la del promedio más alto; las poblaciones P3 y P4 también presentan valores positivos. En el caso de carotenoides y flavonoides la P5 presenta los valores más altos y P4 los más bajos, estos datos nos proporcionan una asociación entre ellos, lo contrario en resultados encontrados por Butcher *et al.*, 2012 en Chile habanero.

Cuadro 3. Comparación de medias para capsaicinoides, carotenoides y flavonoides en las nueve poblaciones y 11 cruzas de chile Guajillo.

Pob. y cruzas	Cap. (SHU)	DH (SHU)	Cap. Total (SHU)	Caro. (mg/100 g) MS	Flavo. (mg/100 g) MS
P1	2582 g-o	1355 g-o	3937 g-m	94.97 k-s	21.4 r
P2	8777 a	4604 a	13381 a	76.58 q-s	31.0 l-r
P3	3932 b-i	2063 b-i	5995 b-j	133.4 b-f	33.9 k-r
P4	4148 b-i	2176 b-i	6324 b-h	86 p-s	35.2 j-q
P5	1829 k-o	960 k-o	2789 k-m	126.6 d-h	53.4 e-h
P6	2351 i-o	1234 i-o	3585 i-m	120.7 d-k	27.5 n-r
P7	2954 e-n	1550 e-n	4504 d-l	153.8 a-c	32.3 l-r
P8	2456 h-n	1288 h-o	3744 h-m	159.8 ab	58.5 c-e
P9	1931 j-o	1013 j-o	2944 l-m	125.8 d-i	22.5 q-r
P1xP9	5531 b	2901 b	8432 b	72.89 r-s	36.2 j-p
P2xP5	1220 m-o	640 m-o	1860 l-m	122.0 d-j	66.9 b-d
P2xP6	2296 i-o	1205 i-o	3501 g-m	106.2 g-p	37.6 j-p
P3xP4	1121 n-o	588 n-o	1709 l-m	101.2 i-q	32.0 l-r
P3xP5	1145 n-o	601 n-o	1746 l-m	107.1 f-p	30.7 m-r
P3xP7	3599 c-j	1888 c-k	5487 d-l	101.8 i-q	55.8 d-f
P3xP9	3322 d-l	1743 d-l	5065 b-j	93.5 l-s	41.3 g-l
P4xP6	3765 b-j	1975 b-j	5740 b-h	80.1 p-s	72.5 b
P4xP9	2873 f-n	1507 f-n	4380 f-m	76.7 q-s	30.4 m-r
P5xP6	4784 b-e	2509 b-e	7293 b-d	120.5 d-l	47.1 e-k
P7xP9	2788 f-n	1463 f-n	4251 d-l	92.95 m-s	89.1 a

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Cap.: capsaicina; DH.: dihidrocapsaicina; Cap. Tot.: Capsaicinoides totales; Caro.: Carotenoides; Flavo.: Flavonoides. SHU= Scoville Heat Units. MS: miligramos por gramo de materia seca.

En cuanto a la aptitud combinatoria específica (ACE) la cruce P1 x P9 para capsaicina, dihidrocapsaicina y el total de capsaicinoides destaco por presentar el valor más alto ($P \leq 0.001$) (Cuadro 5).

En carotenoides y flavonoides sobresalió la cruce P7 x P9 (1673 y 38.82 respectivamente) con los valores más altos (Cuadro 5).

Cuadro 4. Comparación de medias para caracteres de color en las nueve poblaciones y 11 cruza de Chile Guajillo.

Pob. y cruza	Frutos maduros			Frutos secos		
	Luminosidad	Croma	h°	Luminosidad	Croma	Hue (°)
1	28.5 ab	25.6 e-f	28.7 ab	22.4 abc	12.5 e-l	21.6 abc
2	28.4 ab	36.6 a-e	26.5 b	23.0 abc	17.1 a-k	20.0 abc
3	28.3 ab	34.4 a-f	29.7 ab	29.5 a	11.9 g-o	21.9 abc
4	29.0 ab	38.7 a-d	28.4 b	20.5 abc	19.4 a-j	20.9 abc
5	32.9 ab	29.0 c-f	25.5 b	20.3 abc	12.1 g-l	17.8 bc
6	29.0 ab	30.3 b-f	24.6 b	21.6 abc	15.8 b-l	19.2 bc
7	31.8 ab	28.0 c-f	24.1 b	23.9 abc	15.9 b-l	18.4 bc
8	31.1 ab	27.5 d-f	24.1 b	22.9 abc	9.5 kl	19.2 bc
9	26.9 ab	36.9 a-e	28.2 b	27.9 ab	21.3 a-e	21.6 abc
1x9	31.0 ab	32.0 a-f	24.2 b	15.4 c	15.3 c-l	19.8 abc
2x5	25.7 ab	39.5 abc	29.5 ab	24.4 abc	11.3 h-l	19.2 bc
2x6	30.7 ab	29.3 c-f	23.7 b	25.2 abc	21.8 a-d	21.8 abc
3x4	27.2 ab	32.6 a-f	25.9 b	25.8 abc	20.7 a-g	20.0 abc
3x5	26.5 ab	29.2 c-f	26.2 b	19.8 abc	25.8 a	22.9 abc
3x7	30.0 ab	33.7 a-f	25.8 b	23.5 abc	19.6 a-i	19.6 abc
3x9	25.9 ab	36.3 a-e	27.6 b	23.0 abc	19.4 a-j	19.6 abc
4x6	23.6 b	43.3 a	30.3 ab	26.1 abc	15.4 c-l	20.8 abc
4x9	32.7 ab	37.1 a-e	25.9 b	26.7 abc	19.5 a-j	18.7 bc
5x6	28.3 ab	29.9 b-f	25.0 b	21.5 abc	22.5 a-c	22.0 abc
7x9	24.9 ab	38.7 a-d	29.0 ab	22.3 abc	12.3 f-l	20.5 abc

Letras distintas en una misma columna indican valores estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

La ACG para el caso del color del fruto solo el carácter de croma fue significativo ($P \leq 0.01$) tanto para fruto maduro como en seco. De acuerdo a los datos observados, P4 (2.1 y 2.16) presento el valor más alto y positivo para este carácter, para ambos estados del fruto (maduro y seco) (Cuadro 6). El valor más alto para la luminosidad y h° se observa en P7 en frutos maduros, siendo esta población la de menor valor en el carácter de croma para frutos secos.

Cuadro 5. Aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) en nueve poblaciones para caracteres fitoquímicos de chile Guajillo.

Pob. y cruzas	Cap.	DH	Cap. Tot.	Caro.	Flavo.
	(SHU)	(SHU)	(SHU)	(mg/100 g) MS	(mg/100 g) MS
1	-77	-40	-166	-0.67	-3.58 ***
2	738 ***	387 ***	1125 ***	0.83	-0.72
3	122	64	186	1.98	0.32
4	120	63	183	-13.36***	-2.35 ***
5	-405 ***	-213 ***	-618 ***	13.20 ***	5.37 ***
6	-53	-28	-80	-1.18	1.74 **
7	224 **	117 **	341 *	2.96	-0.45
8	-427 ***	-224 ***	-651 ***	3.45 **	1.83 **
9	-241 **	-127 **	-368 ***	-7.22 ***	-2.16 ***
1x9	2533 ***	1329 ***	3862 ***	-51.26***	-15.56 ***
2x5	-2138 ***	-1121.7 ***	-3260 ***	-6.14	19.22 ***
2x6	-1414 ***	-741.8 ***	-2156 ***	-7.64	-6.52 **
3x4	-2146 ***	-1125.9 ***	-3272 ***	-1.56	-9.02 ***
3x5	-1597 ***	-837.7 ***	-2435 ***	-22.19 ***	-18.06 ***
3x7	228	119.7	348	-17.22 ***	12.89 ***
3x9	1079 **	566.0 *	1645 **	-0.14	-9.79 ***
4x6	673 *	353.1 *	1026 **	-19.47 ***	30.04 ***
4x9	852 **	447.2 *	1300	-18.35 ***	-11.30 ***
5x6	2216 ***	1162.7 ***	3379 ***	-5.68	-3.08
7x9	-737 *	-386.8 *	-1124	16.73***	38.82 ***

*, **, ***: Significativo a 0.05, 0.01, 0.001, respectivamente. Cap.: capsaicina; DH.: dihidrocapsaicina; Cap. Tot.: Capsaicinoides totales; Caro.: Carotenoides; Flavo.: Flavonoides. SHU= Scoville Heat Units. MS: miligramos por gramo de materia seca.

En los efectos de ACE, la cruzada P4 x P9 (3.6) presentó el mayor valor para la luminosidad de fruto maduro, para croma, h° en fruto maduro y luminosidad en fruto seco el valor más alto fue en la cruzada P4 x P6 (7.7, 3.97 y 2.97 respectivamente). La cruzada P3 x P5 presenta los valores más altos para las variables croma y h° (Cuadro 6).

Cuadro 6. Aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) en nueve poblaciones y sus cruzas para caracteres de color de chile Guajillo.

Población y Cruza	Fruto maduro			Fruto seco		
	Luminosidad	Croma	Hue (°)	Luminosidad	Croma	Hue (°)
1	-0.2	-0.9	-0.2	-0.54	-0.78	0.12
2	.021	1.6 **	-0.28	-0.55	-0.18	-0.06
3	-0.2	0.8	0.07	1.06	0.75	0.44
4	0.3	2.1 ***	-0.01	-0.07	2.16 ***	0.53
5	0.4	-2.0 ***	0.79	-0.51	-0.29	-0.6
6	-0.77	0.2	-0.46	-0.04	-0.44	-0.34
7	0.45	-1.5 **	1.05	-0.19	-1.23 **	-0.39
8	0.31	-1.8 **	-0.76	0.87	-0.38	0.24
9	-0.51	1.4	-0.19	-0.02	0.4	0.05
1x9	2.9	-7.7 ***	0.18	-7.06	-2.92	0.14
2x5	-3.8 **	6.5 ***	2.22	2.14	-4.56 **	-0.58
2x6	2.4	-5.9 **	-2.37	2.53	6.08 ***	1.80 *
3x4	-1.8	-3.5	-0.95	1.51	1.39	-1.39
3x5	-2.5	-2.9	-1.44	-4.00 *	9.01 ***	2.63 **
3x7	0.9	1.2	-2.11	-0.61	3.69 *	-0.86
3x9	-2.5	0.4	3.70	2.7	-4.16 *	-0.76
4x6	-4.8 ***	7.7 ***	3.97 *	2.97	-2.71	0.15
4x9	3.6	1.5	0.96	0.9	-0.73	-2.90 **
5x6	-0.2	-1.6	-2.1	-1.21	6.90 ***	2.55 **
7x9	-1.9	3.1	-3.43	0.28	-1.28	-0.76

*, **, ***: Significativo a 0.05, 0.01, 0.001, respectivamente.

La información obtenida en esta investigación es importante para ser usada en el mejoramiento genético en caracteres de calidad de *Capsicum*, debido a que en los programas de mejoramiento basados en cruzas dialelicas la información es actualmente escasa. En las cruzas dialelicas entre las nueve poblaciones de chile Guajillo, indican que los cuadrados medios para ACE para todas las variables y ACG para la mayoría de los caracteres, excepto luminosidad y h° en frutos secos, son estadísticamente significativos, lo que indica la importancia de la acción genética aditiva y no aditiva en las variables estudiadas.

Estos resultados nos pueden conducir a que la hibridación mediante la selección de cruza seguida por la selección recurrente de segregantes superiores sería la técnica que debe elegir el fitomejorador para la obtención de variedades superiores en la calidad del fruto.

La acción genética aditiva y no aditiva también fue reportada por Kumari *et al.* (2014) quienes encontraron que la acción génica no aditiva fue predominante para los 17 caracteres estudiados y el efecto de acción génica aditiva para el contenido de capsantina. Naresh *et al.* (2016), reporta significancia tanto en los componentes aditivos como en los de dominancia en caracteres bioquímicos, observaron dominancia para carotenoides y predominancia del efecto aditivo en capsaicinoides, mientras que Lee *et al.* (2012) mostraron acción génica aditiva para carotenoides totales.

Los valores descritos en esta investigación para capsaicinoides (13381 SHU) superan los valores que establece la Norma Mexicana NMX.FF—107/1-SCFI-2006 para el chile Guajillo (3001-5000 SHU) y son parecidos a los reportados por González-Zamora *et al.* (2013) (13,704.8 SHU) para una variedad mexicana San Luis de Chile Guajillo, Orellana-Escobedo *et al.* (2013) reporta 961.13 SHU para Guajillo cultivado en el estado de Chihuahua. La variación en la concentración puede deberse a que la pungencia es dada con el 90 % por el contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina, la cual depende del genotipo y factores ambientales (Gurung *et al.*, 2011; Vázquez-Flota *et al.*, 2007). Por lo mismo el rango de capsaicinoides totales que va de 2789 a 13381 SHU entre los 45 materiales estudiados en esta investigación puede deberse a que fueron variedades nativas de origen diverso, varias de estas colectas han permanecido más tiempo en sus lugares de origen y otras intercambiado por los agricultores.

Con respecto a carotenoides el rango de valores promedio indico una alta variabilidad, que puede deberse a la alta diversidad en las poblaciones utilizadas, la concentración mayor en nuestra investigación se presentó en una cruce, lo que concuerda con Naresh *et al.* (2016) el cual reporta que el valor promedio de los progenitores vario de 52.27 mg/100 g (IHR500) a 208.54 mg/100 g para carotenoides rojos y de 80.42 mg/100 g (IHR3453) a 278.38 mg/100 g para carotenoides totales, y los hibridos variaron de 79.70 mg/100 g (IHR45506 x IHR2451) a 367.96 mg/ 100 g (IHR4503 X IHR2451), este autor reporta mayores concentraciones que los reportados en esta investigación, al igual que Wall *et al.* (2001) y Hernández-Ortega *et al.* (2012), (3406 µg/g) y (3721 µg/g) respectivamente, Collera- zuñiga *et al.* (2005) y Hervert-Hernández *et al.* (2010), reporta valores de concentración más baja 87.6 mg/ 100 g y 6.76 mg/ 100 g de ms. Estas diferencias en el contenido de carotenoides podrían deberse a las diferencias en el genotipo, etapa de madurez, proceso de secado, condiciones de crecimiento (Wall *et al.*, 2001; Gómez-García y Ochoa-Alejo, 2013).

Para el caso de flavonoides, trabajos realizados en México reportan para chile piquín 50.1- 425 mg/100 g (Vera-Guzmán *et al.*, 2011), en siete diferentes chiles en fresco y procesados con un rango de 201 (Meoqui) a 441 (Serrano) mg/100 g, (Alvarez-Parrilla *et al.*, 2011) en pimienta 23.15 mg/kg en peso fresco, y en Cayenne 39 mg/100 g de peso fresco (Howard *et al.*, 2000). Existe una amplia variación en los diferentes tipos de chile en las concentraciones, los principales factores su contenido son el genotipo, estado de madurez del fruto y las condiciones de almacenamiento (Ross y Kasum, 2002; Vera-Guzmán *et al.*, 2011).

En cuanto al color, se encontró variación entre cruces y poblaciones para los tres caracteres evaluados, los frutos secos presentaron un color rojo más intenso, reportes de (Martínez-Damián *et al.*, 2019) en chile Guajillo, no encontraron diferencias significativas

para brillantez y cromaticidad de color, sin embargo, el h° reporta que fue menor en la colecta 25 (33.77°).

El análisis de ACG nos proporciona que ninguna población presento efectos de ACG para todos los caracteres evaluados. Sin embargo, P2 presento altos efectos de ACG para los caracteres de capsaicinoides y P5 para flavonoides y carotenoides, los cuales se pueden utilizar como poblaciones en un programa de mejoramiento para aumentar las concentraciones en estos caracteres.

La concentración de capsaicina, dihidrocapsaicina y el total fueron los de mayor concentración, al igual que los de mayor efecto de ACG en P2. Zewdie y Bosland (2000) comentan que la asociación de altos contenidos de capsaicinoides con una alta capacidad de combinación general positiva de los padres también indica el predominio de la acción del gen aditivo en la herencia de capsaicinoides.

Los resultados de ACE, no necesariamente implica que las mejores combinaciones híbridas se puedan obtener solo de combinaciones de progenitores de ACG “buenos” x “buenos” sino también de las combinaciones de progenitores de ACG “buenos” x “malos” y “malos” x “malos”. Los resultados obtenidos en cruces con efectos de ACE positivos significativos que involucran combinadores generales "malos" x "malos" o "buenos" x "malos" como padres pueden atribuirse a la presencia de interacciones no alélicas (Singh *et al.*, 2014).

Naresh *et al.* (2016) en *Capsicum annuum* reporta que los efectos de aptitud combinatoria para IHR500, IHR2451 y IHR4516 fueron los padres más adecuados para desarrollar híbridos para las industrias de procesamiento de productos secos. Jindal *et al.*

(2015) reporta que los efectos genéticos no aditivos tuvieron un mayor papel en el control de la herencia de los rasgos de calidad.

3.6 CONCLUSIONES

Las poblaciones y sus cruzas mostraron una importante variación en cuanto a los metabolitos secundarios que se cuantificaron:

La P2 mostró la concentración más alta de capsaicinas, así como una alta ACG. Mientras que las poblaciones P8 y P5 además de presentar alta ACG, mostraron las mayores concentraciones de carotenos y flavonoides

Las cruzas que mostraron valores altos en ACE y positivos fueron la P1 x P9 en la que se observó una alta concentración de los capsaicinoides, mientras que en la cruce P7 x P9 mostró las concentraciones más altas de carotenoides y flavonoides.

Agradecimientos

Agradecer al Colegio de Postgraduados (COLPOS) y al Consejo Mexicano de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por financiar este trabajo.

3.7 BIBLIOGRAFÍA

- Acquaah G (2012)** Principles of plant genetics and breeding, 2nd edn. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Alvarez-Parrilla E, de la Rosa L A, Amarowicz R & Shahidi F (2010)** Antioxidant activity of fresh and processed Jalapeno and Serrano peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 163-173.
- AOAC International (1998)** AOAC Official Method 995.03: Capsaicinoids in *Capsicums* and their extractives. In: Official Methods of Analysis AOAC International (ed). AOAC, Gaithersburg, MD, USA.
- Barceloux D G (2009)** Pepper and capsaicin (*Capsicum* and Piper species). *Disease-a-Month*, 6(55), 380-390.
- Bosland P W, Votava E J, & Votava E M (2012)** Peppers: Vegetable and spice capsicums. CABI publishing. New York. 204 p.
- Butcher J D, Crosby K M, Yoo K S, Patil B S, Ibrahim A M H, Leskovar D I, & Jifon J L (2012)** Environmental and genotypic variation of capsaicinoid and flavonoid concentrations in Habanero (*Capsicum chinense*) peppers. *HortScience*, 47(5), 574-579.
- Chang C C, Yang M H, Wen H M, & Chern J C (2002)** Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3).
- Collera-Zúñiga O, Jiménez F G, & Gordillo R M (2005)** Comparative study of carotenoid composition in three mexican varieties of *Capsicum annum* L. *Food Chemistry*, 90(1-2), 109-114.
- Do Rêgo E R, Do Rêgo M M, Finger F L, Cruz C D, & Casali V W D (2009)** A diallel study of yield components and fruit quality in chilli pepper (*Capsicum baccatum*). *Euphytica*, 168(2), 275-287.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura (2019)** Cultivos. Mundo. Producción, cantidad. Chiles, pimientos picantes, pimientos (verdes). 2016. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Página consultada 10/06/2019).
- Giuffrida D, Dugo P, Torre G, Bignardi C, Cavazza A, Corradini C, & Dugo G (2013).** Characterization of 12 *Capsicum* varieties by evaluation of their carotenoid profile and pungency determination. *Food Chemistry*, 140(4), 794-802.
- Gómez-García M, & Ochoa-Alejo N (2013)** Biochemistry and molecular biology of carotenoid biosynthesis in chili peppers (*Capsicum* spp.). *International Journal of Molecular Sciences*, 14(9), 19025-19053.

- González-Zamora A, Sierra-Campos E, Luna-Ortega J, Pérez-Morales R, Ortiz J, & García-Hernández J (2013)** Characterization of different capsicum varieties by evaluation of their capsaicinoids content by high performance liquid chromatography, determination of pungency and effect of high temperature. *Molecules*, 18(11), 13471-13486.
- Griffing B (1956)** Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian journal of biological sciences*, 9(4), 463-493.
- Gurung T, Techawongstien S, Suriharn B, & Techawongstien S (2011)** Impact of Environments on the Accumulation of Capsaicinoids in *Capsicum* spp. *HortScience*, 46(12), 1576-1581.
- Guzmán I, Bosland P W, & O'Connell M A (2011)** Heat, color, and flavor compounds in Capsicum fruit. In *The Biological Activity of Phytochemicals* (pp. 109-126). Springer, New York, NY.
- Jindal S K, Kaur D, Dhaliwal S, & Chawla N (2015)** Combining Ability and Heterosis for Qualitative Traits in Chili Pepper (*Capsicum annuum* L.). *International Journal of Horticulture*, 5.
- Hachiya S, Kawabata F, Ohnuki K, Inoue N, Yoneda H, Yazawa S & Fushiki T (2007)** Effects of CH-19 Sweet, a non-pungent cultivar of red pepper, on sympathetic nervous activity, body temperature, heart rate, and blood pressure in humans. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 71(3), 671-676.
- Hernández-Ortega M, Ortiz-Moreno A, Hernández-Navarro M D, Chamorro-Cevallos G, Dorantes-Alvarez L, & Necochea-Mondragón H (2012)** Antioxidant, antinociceptive, and anti-inflammatory effects of carotenoids extracted from dried pepper (*Capsicum annuum* L.). *BioMed Research International*, 2012.
- Hervert-Hernández D, Sáyago-Ayerdi S G, & Goñi I (2010)** Bioactive compounds of four hot pepper varieties (*Capsicum annuum* L.), antioxidant capacity, and intestinal bioaccessibility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(6), 3399-3406.
- Howard L R, Talcott S T, Brenes C H, & Villalon B (2000)** Changes in phytochemical and antioxidant activity of selected pepper cultivars (*Capsicum* species) as influenced by maturity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(5), 1713-1720.
- Kumari S S, Srihari D, Shankar C R, Reddy V C & Sanker A S (2014)** Genetic divergence and combining ability studies for exploitation of heterosis in paprika (*Capsicum annuum* L.). *International Journal of Agricultural Science and Research (IJASR)*, 4(2), 59-66.
- Lee W M, Kwak J H, Kim S, Chae W B, Park D K, Yoon M K & Kang B C (2012)** Genetic Analysis of Carotenoids Content in Red Pepper (*Capsicum annuum* L.) Fruit using Complete Diallel Cross. *Korean Journal of Breeding Science*, 44(4).
- McGuire R G (1992)** Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 27(12), 1254-1255.

- Nagata M & Yamashita I (1992)** Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 39 (10), 925-928.
- Martínez-Damián M T, Cruz-Álvarez O, Moreno-Pérez E D C, & Valle-Guadarrama S (2019)** Intensidad de color y compuestos bioactivos en colectas de chile guajillo del norte de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(1), 35-49.
- Meneses-Reyes J C, Soto-Hernández R M, Espinosa-Solares T, & Ramírez-Guzmán M E (2008)** Optimización del proceso de extracción de flavonoides de flor de manzanilla (*Matricaria recutita* L.). *Agrociencia*, 42(4), 425-433.
- Naresh P, Reddy K M, Reddy M K, & Ravishankar K V (2012)** Variability in Capsaicinoids content and phylogenetic analysis of AT3, and Acyltransferase gene in Chilli (*Capsicum annum* L.). *Vegetable Science*, 39(1), 16-20.
- Naresh P, Rao V K, Reddy L, Reddy A, Venkatachalapathi V, & Reddy M (2016)** Genetic analysis for fruit biochemical traits (capsaicinoids and carotenoids) and dry fruit yield in chilli (*Capsicum annum* L.). *Industrial Crops and Products*, 94, 920-931.
- Orellana-Escobedo L, Garcia-Amezquita L E, Olivas G I, Ornelas-Paz J J & Sepulveda D R (2013)** Capsaicinoids content and proximate composition of Mexican chili peppers (*Capsicum* spp.) cultivated in the State of Chihuahua: Contenido de capsaicinoides y composición proximal de chiles mexicanos (*Capsicum* spp.) cultivados en el estado de Chihuahua. *CyTA-Journal of Food*, 11(2), 179-184.
- Perucka I, & Materska M (2001)** Phenylalanine ammonia-lyase and antioxidant activities of lipophilic fraction of fresh pepper fruits *Capsicum annum* L. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2(3), 189-192.
- Rao A V, & Rao L G (2007)** Carotenoids and human health. *Pharmacological Research*, 55(3), 207-216.
- Rodríguez-Burruezo A, GonzálezMas M D C, & Nuez F (2010)** Carotenoid composition and vitamin A value in ají (*Capsicum baccatum* L.) and rocoto (*C. pubescens* R. & P.), 2 pepper species from the Andean region. *Journal of food science*, 75(8), S446-S453.
- Ross J A & Kasum C M (2002)** Dietary flavonoids: bioavailability, metabolic effects, and safety. *Annual Review of Nutrition*, 22(1), 19-34.
- Singh P, Cheema D S, Dhaliwal M S & Garg N (2014)** Heterosis and combining ability for earliness, plant growth, yield and fruit attributes in hot pepper (*Capsicum annum* L.) involving genetic and cytoplasmic-genetic male sterile lines. *Scientia Horticulturae*, 168, 175-188.

- Sprague G F & Tatum L A (1942)** General vs. specific combining ability in single crosses of corn 1. *Agronomy Journal*, 34(10), 923-932.
- Vázquez-Flota F, de Lourdes Miranda-Ham M, Monforte-González M Gutiérrez-Carbajal G, Velázquez-García C, & Nieto-Pelayo Y (2007)** La biosíntesis de capsaicinoides, el principio picante del chile. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4), 353-360.
- Vera-Guzmán A M, Chávez-Servia J L, Carrillo-Rodríguez J C & López M G (2011)** Phytochemical evaluation of wild and cultivated pepper (*Capsicum annuum* L. and *C. pubescens* Ruiz & Pav.) from Oaxaca, Mexico. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(4), 578.
- Wall M M, Waddell C A & Bosland P W (2001)** Variation in β -carotene and total carotenoid content in fruits of *Capsicum*. *HortScience*, 36(4), 746-749.
- Zhang Y (2003)** Diallel-SAS: A Program for Griffing's Diallel Methods. MS Kang, Handbook of Formulas and Software for Plant Geneticists and Breeders.
- Zewdie Y & Bosland P W (2001)** Capsaicinoid profiles are not good chemotaxonomic indicators for *Capsicum* species. *Biochemical Systematics and Ecology*, 29(2), 161-169.

CONCLUSIONES GENERALES

Con la caracterización genética y bioquímica de la presente investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones generales:

Los caracteres agronomicos, calidad de semilla y bioquímicos se determinaron principalmente por efectos de ACG, los cuales fueron mayores a los de ACE, indicando que la acción génica aditiva es la que tiene mayor participación en la manifestación genética en estos caracteres. La estrategia de mejoramiento más efectiva sería la selección de poblaciones que acumulen efectos favorables.

La cruce entre las poblaciones P1 x P9 origino plantas con caracteres deseables, como el NFP, valores altos y positivos en ACG, heterosis y heterobeltiosis, además presentó alta concentración de capsaicinoides.

Los mayores promedios en los caracteres evaluados y que también presentaron altos efectos de ACG en los caracteres de rendimientos de frutos frescos y secos fueron: peso promedio de frutos frescos y secos, longitud de fruto, área de semilla y Capsaicinoides (Cap, dihidrocapsaicina y Cap. Total).

Los resultados generados también nos indican que las cruza superiores con buena ACE, no necesariamente se derivan de padres con efectos positivos para ACG.