

ESTIMACIÓN DE ACG, ACE Y HETEROSIS EN
CINCO VARIEDADES DE CHILE SERRANO
(*Capsicum annuum* L.).

FRANCISCO NIETO MUÑOZ

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para

Obtener el Grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
EN FITOMEJORAMIENTO



UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Noviembre del 2007

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

ESTIMACIÓN DE ACG, ACE Y HETEROSIS EN CINCO VARIEDADES DE
CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L.).

TESIS

POR

FRANCISCO NIETO MUÑOZ

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría
y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS
EN FITOMEJORAMIENTO

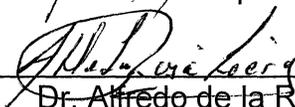
COMITÉ PARTICULAR

Asesor Principal:



Dr. Alfonso López Benítez

Asesor:



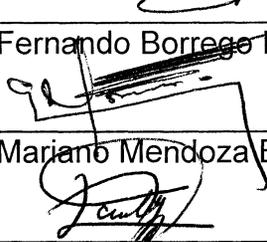
Dr. Alfredo de la Rosa Loera

Asesor:



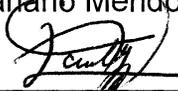
Dr. Fernando Borrego Escalante

Asesor:

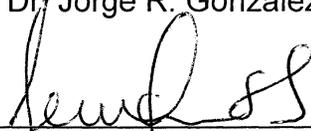


Dr. Mariano Mendoza Elos

Asesor:



Dr. Jorge R. González Domínguez



Dr. Jerónimo Landeros Flores
Director de postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Noviembre del 2007

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Alfonso López Benítez, el haberme dado la oportunidad de poder concluir con esta investigación y por su apoyo durante el desarrollo de la misma.

Mi más sincera gratitud al Dr. Alfredo de la Rosa Loera, por su apoyo incondicional para la planeación, conducción y sugerencias en la revisión de la presente investigación.

Al Dr. Fernando Borrego Escalante, por su apoyo constante, lo cual permitió lograr los objetivos del presente estudio.

Al Dr. Mariano Mendoza Elos, por su apoyo constante y la amistad que siempre me ha brindado, permitiendo el logro de los objetivos del presente estudio.

Al Dr. Jorge R. González Domínguez, por el apoyo que me brindó y sus comentarios de motivación en la recta final del camino, lo cual permitió lograr los objetivos del presente estudio.

Al Dr. Gaspar Martínez Zambrano, por su incondicional e invaluable apoyo en el desarrollo de esta investigación. †

Al Ing. M. C. José Luz Chávez Araujo por la amistad incondicional y el apoyo que siempre me ha brindado.

Al Ing. Alfredo Fernández Gaytán por la amistad que siempre me ha brindado.

Al M. V. Z. Alejandro Altamira Escalante por la amistad y el apoyo que siempre me ha brindado.

Al M. C. Juan Jaime Guerrero Martínez por la amistad incondicional que siempre me ha brindado.

A la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA) por el apoyo otorgado en la realización de mis estudios.

A la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) y al Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL) por las facilidades otorgadas.

Al los Doctores. Catarino Perales Segovia, Carlos R. Cruz Vázquez e Ignacio Mejía Haro, quienes a través de la División de Estudios de Postgrado e

Investigación (DEPI) del Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL), me brindaron las facilidades necesarias para la obtención del grado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme proporcionado los recursos económicos para la realización de mis estudios.

A mi ALMA TERRA MATER, por haberme dado la oportunidad a través del departamento de Fitomejoramiento para culminar una etapa más de mi carrera profesional y superación personal.

A mis profesores, por el regalo que me brindaron al haberme transmitido desinteresadamente sus conocimientos.

Al M. C. Modesto Colín Rico, Dr. Armando Muñoz Urbina, Dr. José Roberto Augusto Dorantes González, Dr. Ernesto Ruiz Cerda, Dr. Rogelio Aldaco Nuncio, M. C. Sergio Cortés Gamboa, Ing. Sauly Argelia Camacho, Sra. Yolanda Sánchez V., M. C. Francisco Almansa P., M. C. Adrián, M. C. Josafat e Hilda Susana, por la amistad y apoyo que me brindaron.

A todas aquellas personas que ahora escapan a mi mente, pero que con su aportación, desde una palabra de aliento hasta un consejo, me permitieron llegar a la recta final.

DEDICATORIA

A mi esposa MARIA ELENA LAURA CARRIÓN CONTRERAS, con todo mi amor por su apoyo incondicional durante estos años y sobre todo por la paciencia para soportar mis inquietudes de desarrollo personal y profesional.

A mis hijos LAURA IBETH, FRANCISCO ENRIQUE NABOR, MARIA ILEANA Y JOSEPH ABRAHAM con profundo cariño por el tiempo de atención que les he quitado.

A mis PADRES, a quienes les doy gracias por darme la vida y guiarme por el buen camino para culminar mis aspiraciones profesionales.

A mis hermanos Martha Rosalinda, Nabor, Ofelia Geraldina, Noemí, Gabriel, María Antonia, cuñados, sobrinos y demás familiares por sus consejos y palabras de aliento para mi superación profesional.

COMPENDIO

**ESTIMACIÓN DE ACG, ACE Y HETEROSIS EN CINCO VARIEDADES
DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L.)**

POR

FRANCISCO NIETO MUÑOZ

DOCTORADO

FITOMEJORAMIENTO

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA SALTILLO, COAHUILA, NOVIEMBRE, 2007**

Dr. Alfonso López Benítez – Asesor –

**Palabras Clave: Chile serrano; Aptitud combinatoria general (ACG);
Aptitud combinatoria específica (ACE); Heterosis.**

En la presente investigación se trabajó con germoplasma de cinco variedades de chile serrano utilizando dos diseños dialélicos, el primero propuesto por Griffing (1956), Método IV, Modelo I, el segundo el Método II propuesto por Gardner y Eberhart (1966), en los cuales se trabajó con las variedades de chile serrano: SER 1, SER 2, SER 3, Paraíso y Tampiqueño. El experimento se estableció en el CESTAM que se localiza en el Km. 55 de la carretera Tampico-Mante, con coordenadas de: Latitud Norte 22° 34' y Longitud Oeste 98° 05' y Altitud de 60 msnm, en la Huasteca al Nororiente de la República Mexicana en el ciclo 2006-2007. Esta región posee una temperatura media anual de 23 °C. En esta localidad se utilizó el diseño de Bloques Completos al Azar con dos repeticiones, las características agronómicas evaluadas fueron: número total de frutos (NTF), peso total de frutos (PTF), altura de planta (AP), días a inicio de floración (DIF), días a inicio de cosecha (DIC), longitud de fruto (LF) y diámetro de fruto (DF).

Los cuadrados medios del análisis dialélico (Método IV, Modelo I de Griffing, 1956) de las 10 cruzas de chile serrano mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) y altamente significativas ($p \leq 0.01$) para las fuentes de variación de cruzas y para los cuadrados medios de aptitud combinatoria general (ACG) en todas las características, excepto AP. Los cuadrados medios para aptitud combinatoria específica (ACE) fueron consistentemente más pequeños que los cuadrados medios para ACG y fueron no significativos. Los coeficientes de variación mostraron valores de 2.93 por ciento para DIC hasta 19.72 por ciento para AP.

Los progenitores P1 (SER 1), P5 (Tampiqueño) y P3 (SER 3) presentaron valores más altos de ACG para rendimiento (PTF), los progenitores P5 (Tampiqueño) y P3 (SER 3) también presentaron altos valores de ACG para número total de frutos (NTF). Las cruzas donde intervinieron estos progenitores mostraron altos valores de ACE para la variable PTF (1x4, 2x3, 3x5 y 4x5) y para la variable NTF (2x3, 2x5 y 4x5). Para las variables DIF, DIC, LF y DF los progenitores P1 (SER 1) y P2 (SER 2) mostraron valores sobresalientes de ACG y formaron parte de las cruzas con alto valor de ACE.

En el análisis dialélico realizado bajo el Método II de Gardner y Eberhart (1966) se observaron diferencias significativas para los cuadrados medios de genotipos, efecto varietal (v_j) y heterosis total (h_{jj}) en todas las variables excepto AP. Para la heterosis promedio (h) se observaron diferencias altamente significativas solo para PTF. La heterosis varietal (h_j) presentó diferencias significativas para todas las variables y fue la de mayor importancia comparada con los efectos de heterosis promedio y específica. Con respecto a la heterosis específica (s_{jj}) se observaron diferencias significativas solo para las características DIF, DIC y DF. Los coeficientes de variación presentaron valores aceptables, encontrándose en un rango de 2.67 por ciento para DIC hasta 17.19 por ciento para AP.

Los valores más altos de heterosis varietal (h_j) para NTF fueron obtenidos por P3 (SER 3) y P5 (Tampiqueño) y para PTF por P1 (SER 1), P3 (SER 3) y

P5 (Tampiqueño). Los progenitores (SER 1, SER 3 y SER 4) tuvieron efectos para reducir la altura de planta. Los progenitores (SER 2, SER 4 y Tampiqueño) tendieron a reducir los días a inicio de floración (DIF) y los progenitores SER 2 y Tampiqueño también redujeron los días a inicio de cosecha (DIC). Con respecto a la longitud y diámetro de fruto, los progenitores SER 3 y SER 4 tuvieron una tendencia a reducir la longitud de fruto (LF) y diámetro de fruto (DF).

Finalmente se puede concluir que el análisis de Gardner y Eberhart (1966) proporcionó una mejor separación de los efectos aditivos y de dominancia para el análisis dialélico realizado con estos materiales, detectando significancia en las fuentes de variación: variedades (v_j), heterosis promedio (h), varietal (h_j) y específica (s_{jj}). Los efectos significativos para ACG detectados por el Método IV, Modelo I de Griffing (1956) y los efectos significativos para el efecto varietal (v_j) observados en el Método II de Gardner y Eberhart (1966) sugieren que la variación entre las cruzas fue principalmente debida a los efectos aditivos mas que a los no aditivos, lo cual indica que estas características pueden ser mejoradas fácilmente mediante diversos procedimientos de selección intra e interpoblacional.

ABSTRACT

ESTIMATION OF GENERAL COMBINING ABILITY (GCA), ESPECIFIC COMBINING ABILITY (ECA) AND HETEROSIS IN FIVE VARIETIES OF SERRANO PEPPER (*Capsicum annuum* L.)

BY

FRANCISCO NIETO MUÑOZ

DOCTORADO

PLANT BREEDING

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA SALTILLO, COAHUILA, NOVIEMBRE, 2007

Dr. Alfonso López Benítez – Advisor –

Key Words: Serrano pepper; General combinig ability (GCA); Specific combining ability (SCA); Heterosis.

In the present study was used germoplasma of five varieties of serrano chili utilizing two dialelic designs, the first one proposed by Griffing (1956), method

IV, Model I, the second one, the Method II proposed by Gardner and Eberhart (1966), in which the following varieties of serrano chili: serrano 1, serrano 2, serrano 3, Paraiso and Tampiqueño were used. The experiment was carried out in the CESTAM, located in the Km 55 of the highway Tampico-Mante, presenting a Latitude of 22° 34' North and Longitude 98° 05' West and Altitude of 60 msnm, in the Huasteca to the Noreast of the Mexican Republic in the year of 2006. This region possesses an annual mean temperature of 23 °C. In this locality, a randomized complete Block design was used with two repetitions, the evaluated agronomic characteristics were: total number of fruits (NTF), total weight of fruits (PTF), plant height (AP), days to the early bloom (DIF), days to crop beginning (DEC), fruit longitude (LF), and fruit diameter (DF).

The square means of the diallelic analysis (Method IV, Model I of Griffing, 1956) of all 10 crosses of serrano chili showed significant differences ($p < 0.05$) and highly significant ($p < 0.01$) for the variation sources of crosses and for the mean squares of combinatory general aptitude (ACG) in all the characteristics, except AP. The mean squares for specific combinatory aptitude (ACE) were consistently smaller than those for ACG and they were not significant. The variation coefficients showed values of 2.93 percent for DEC up to 19.72 percent for AP.

The progenitors P1 (serrano 1), P5 (Tampiqueño) and P3 (serrano 3) presented the highest values of ACG for yield (PTF), the progenitors P5 (Tampiqueño) and P3 (serrano 3) had also high values of ACG for total number

of fruits (NTF). The crosses in which these progenitors participated showed high values of ACE for the variable PTF (1x4, 2x3, 3x5 and 4x5) and for the variable NTF (2x3, 2x5 and 4x5). For the variables DIF, DEC, LF and DF, the progenitors P1 (serrano 1) and P2 (serrano 2) showed excellent values of ACG and they were part of crosses with a high value of ACE.

In the diallelic analysis carried out under the Method II of Gardner and Eberhart (1966), significant differences were observed for the mean squares of genotypes, varietal effect (v_j) and total heterosis (h_{jj}) in all the variables except AP. For the average heterosis (h), highly significant differences were observed only for PTF. The varietal heterosis (h_j) presented significant differences for all the variables and it was the most important when compared to the effects of average and specific heterosis. With regard to the specific heterosis (s_{jj}) significant differences were observed only for the characteristic DIF, DEC and DF. The variation coefficients presented acceptable values, being in a range of 2.67 percent for DEC up to 17.19 percent for AP.

The highest values of varietal heterosis for NTF were obtained by P3 (serrano 3) and P5 (Tampiqueño) and for PTF by P1 (serrano 1), P3 (serrano 3) and P5 (Tampiqueño). The progenitors (serrano 1, serrano 3 and serrano 4) had effects to reduce the plant height. The progenitors (serrano 2, serrano 4 and Tampiqueño) showed a tendency to reduce the days to early bloom (DEB) and the progenitors serrano 2 and Tampiqueño also reduced the days to crop beginning (DCB). With regard to the fruit longitude (FL) and fruit diameter (FD),

the progenitors serrano 3 and serrano 4 had a tendency to reduce these variables.

Finally, it can be concluded that the analysis of Gardner and Eberhart (1966) provided a better separation of the additive and dominance effects for the diallelic analysis carried out with these materials, detecting significance in the variation sources: varieties (v_j), average (h), varietal (h_j) and specific heterosis (S_{jj}). The significant effects for ACG detected by the Method IV, Model I of Griffing (1956) and the significant effects for the varietal effects (V_j) observed in the Method II of Gardner and Eberhart (1966) suggest that the variation among crosses was mainly due to the additive rather than no additives effects, which indicates that these characteristics can be improved easily by different procedures of selection into and among populations.

ÍNDICE DE CUADROS	xvi
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Importancia del cultivo de chile en México	3
El cultivo de chile en el mundo	4
Calidad nutritiva.....	5
Centro de origen del género <i>Capsicum</i>	6
El chile serrano (<i>C. annum</i>).....	6
Subtipos de chile serrano.....	7
Calidad y características importantes para el mejoramiento de chile.	8
Cultivares mejorados.	10
Métodos de mejoramiento en autógamias.....	14
Modelos genéticos para el estudio de la aptitud combinatoria y heterosis	17
Obtención de ACG y ACE (Modelos de Griffing).....	17
Estimación de parámetros de heterosis (Gardner y Eberhart).	23
MATERIALES Y MÉTODOS	31
Descripción del área de estudio.	31
Ubicación de los invernaderos.....	31
Ubicación del campo de evaluación.....	32
Material genético.	32
Siembra en charolas y trasplante en el invernadero.....	32
Esquema para la formación de las cruzas.	33
Siembra en charolas de la semilla híbrida.....	33
Diseño experimental.	34
Diseño genético.	34
Variables evaluadas.....	38

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
CONCLUSIONES	59
RESUMEN	63
LITERATURA CITADA	69

ÍNDICE DE CONTENIDO
ÍNDICE DE CUADROS

2.1	Valor nutritivo del Chile	5
2.2	Tipos de cultivares de chile mejorados.	10
3.1	Progenitores empleados en los cruzamientos.	32
3.2	Cuadros medios de análisis de varianza para el Método IV, Modelo I de Griffin (1956)	35
3.3	Cuadros medios de análisis de varianza , bajo el Modelo II de Gardner y Eberhart (1966)	37
4.1	Cuadros medios de análisis dialélicos de 10 cruza s de Chile Serrano evaluadas en la localidad de Cuauhtémoc, Tamaulipas en el ciclo 2006-2007	41
4.2	Valores ACG y ACE para cinco variedades de Chile Serrano y sus 10 cruza s para las características de rendimiento, fenológicas y tamaño de fruto.	43
4.3	Estructura genética de las mejores cuatro cruza s de cada variable de acuerdo al valor más alto de ACE (S_{ii})	46
4.4	Cuadros medios de análisis de varianza de cinco genotipos de chile serrano y sus 10 cruza s para características de rendimiento, fenológicas y tamaño de fruto analizadas bajo el Modelo II de Gardner y Eberhart (1966).	49
4.5	Estimaciones de Heterosis promedio (\bar{h}), varietal (h_j) y específica (S_{jj}) para las características de rendimiento, fenológicas y de	

	tamaño de fruto bajo el Modelo II de Gardner y Eberhart (1966). . . .	52
4.6	Estructura de la heterosis de las mejores cuatro cruzas de cada variable de acuerdo al valor más alto de heterosis específica (S_{ij}). .	56
4.7	Medias de cinco variedades de chile serrano y sus 10 cruzas para las características de rendimiento, fenológicas y tamaño de fruto. . .	58

I. INTRODUCCIÓN

El potencial genético de las poblaciones para propósitos de mejoramiento puede ser evaluado simplemente por la observación de su comportamiento o por el análisis de su pedigrí, origen y anteriores registros de selección. Las propiedades genéticas intrínsecas de las poblaciones solamente se pueden evaluar a través de diseños genéticos. Dentro de estos diseños, la cruce entre poblaciones proporciona información genética que es útil para la selección entre poblaciones, además genera una valiosa información en relación a la heterosis y aptitud combinatoria. Los diseños dialélicos propuestos por Griffing (1956), y Gardner y Eberhart (1966) son los más frecuentemente utilizados. La principal razón de utilizar el método de Griffing (1956) es su generalidad debido a que los progenitores pueden ser clones, líneas puras, líneas endocreadas, o poblaciones de especies autógamas, de polinización cruzada y la facilidad de análisis e interpretación; lo último también caracteriza el método desarrollado por Gardener y Eberhart (1966), el cual se ha utilizado ampliamente para la evaluación de variedades debido a la información que genera sobre el comportamiento de las poblaciones y sus cruces. Al respecto la utilización de variedades en el mejoramiento de chile serrano (*Capsicum annum* L.) es importante para obtener información sobre la naturaleza de la acción génica involucrada en la determinación de

caracteres cuantitativos y de la heterosis entre sus cruzas. El análisis dialélico de cruzas intervarietales también proporciona información que permite la predicción de medias de la población. Así la selección entre poblaciones es posible no solo dentro de un grupo de variedades, sino también entre todas las poblaciones que pueden ser sintetizadas de ellas al hacer uso de procedimientos de predicción. En este contexto la evaluación de variedades de Chile y sus cruzas es de gran importancia en el mejoramiento del Chile serrano para determinar el potencial de las variedades como poblaciones mejoradas y evaluar la respuesta de las variedades a los diferentes esquemas de selección recurrente. Por lo tanto los objetivos del presente trabajo fueron:

1. Estimar la Aptitud Combinatoria General (ACG) y Específica (ACE) de cinco genotipos de Chile serrano y sus cruzas.
2. Estimar los efectos de Heterosis Promedio, Varietal y Específica de los mismos materiales.
3. Efectuar la descripción de la estructura genética de las mejores cruzas en función de su rendimiento y demás características evaluadas en el grupo de cruzas dialélicas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia del cultivo de chile en México

En México el chile (*Capsicum spp.*) se cultiva y se usa como alimento desde tiempos precolombinos. El maíz, frijol, la calabaza y el chile fueron la base de la alimentación de las diferentes culturas que poblaron Mesoamérica. De estos cultivos el único que juega un papel diferente proporcionando vitaminas y minerales y habiendo sido seleccionado por su aportación para condimentar la dieta, es el chile. El chile en México tiene una larga tradición cultural, inclusive se ha especulado que el chile haya sido el primer cultivo domesticado en Mesoamérica. Aún cuando el chile es perecedero y no se conserva adecuadamente a través del tiempo, se han podido encontrar residuos de chile en forma de semillas y tejidos vegetales en muchas fases de las excavaciones en el Valle de Tehuacán, Puebla (Villalón, 1994). En la actualidad el chile es el cultivo hortícola más importante en México y el de mayor consumo popular, especialmente en estado fresco, aunque también se consume procesado en forma de salsas, polvos y encurtidos. En México existe una gran diversidad de chiles de diferentes tipos en cuanto a forma, sabor, tamaño y picor (pungencia). Por otra parte el chile es una hortaliza que genera divisas para México, ya que es el principal país proveedor para Estados Unidos y Canadá en los ciclos

invierno-primavera (Valadez-López, 1996). Otra característica de esta hortaliza es su gran importancia social debido a la enorme cantidad de mano de obra que se genera durante todo el ciclo agrícola.

El cultivo de chile en el mundo

El cultivo de chile tuvo una inmediata acogida en Europa, Asia y la India, después del descubrimiento de América. Poco tiempo después también fue introducido en África, de tal suerte que hoy en día es un cultivo con distribución y uso mundial. Aunque se usa ampliamente como hortaliza fresca, gran parte del consumo se basa en su aportación como especie y condimento, debido a su principio picante, la capsicina, la cual se localiza en la placenta de los frutos. En los últimos años se le han encontrado también usos industriales y medicinales. Como condimento el chile es el número uno del mundo. Las ventas de salsa en Estados Unidos alcanzaron \$675 millones de dólares en 1992 sobrepasando por primera vez las ventas de salsa Ketchup (Villalón, 1994). El aumento en la demanda comercial de chile ha resultado en una exigencia sin precedentes en su producción a gran escala. Para el año 2001, la producción mundial de chile fue de 19,495,034 toneladas, con una superficie sembrada total de 1,491,600 hectáreas y un rendimiento promedio de 13.1 t ha^{-1} , siendo China el principal país productor en el mundo con el 42.26 por ciento de la producción total y el 29.73 por ciento de la superficie total sembrada a nivel mundial. México ocupa el segundo lugar en producción de chile con 1,670,000 toneladas (8.57 por ciento) y una superficie sembrada de 157,400 hectáreas (10.55 por ciento).

Centro de origen del género *Capsicum*

El género *Capsicum* comprende de 20 a 30 especies distribuidas en las regiones tropicales y subtropicales de América. Los taxonomistas modernos reconocen cinco principales especies cultivadas; *C. annuum* L. (chile serrano, jalapeño), *C. frutescens* L. (chile tabasco), *C. chinense* Jacquin (chile habanero), *C. pendulum* Willd (típico de regiones del Perú), *C. pubescens* Ruiz y Pavón (chile perón) llamado ciruelo en la sierra de Querétaro y jalapeño en el sur de Chiapas. México es el centro principal para *C. annuum* con Guatemala como centro secundario. Todas las especies de *Capsicum* tienen $2n = 24$ cromosomas (Heiser, 1979). *C. annuum* es la especie cultivada más importante del hemisferio norte con su centro de domesticación en México (Greenleaf, 1986).

El chile serrano (*Capsicum annuum* L.)

Se considera que el chile serrano es originario de la serranía del norte de Puebla e Hidalgo donde se sembró originalmente (Laborde-Cancino y Pozo-Campodónico, 1984). Debido al amplio rango de adaptación que tiene, su cultivo se desplazó a otras regiones como son las costas del Golfo de México (Veracruz y Tamaulipas) y del Pacífico (Nayarit y Sinaloa). Sin embargo, es común encontrarlo en todas las regiones chileras del país en climas tropicales al igual que zonas templadas y semiáridas. La altura de la planta varía de 0.40 a 1.50 m. Las hojas y el tallo presentan diferentes grados de

pubescencia, aunque también se pueden encontrar materiales glabros. Los frutos son rectos alargados o ligeramente encorvados y algunos de forma cónica. Tienen de dos a 10 cm de longitud, con cuerpo cilíndrico y epidermis lisa; presentan de dos a tres lóculos. Son muy picantes, de color verde que varía desde claro a muy oscuro cuando inmaduro, cambiando a color rojo al madurar, aunque hay genotipos que maduran en café, anaranjado o amarillo. Valadez-López (1996) señala que el color verde de los frutos se debe a la alta cantidad de clorofila acumulada en las capas del pericarpio. Los frutos maduros toman color rojo o amarillo debido a los pigmentos licoperisina, xantofila y caroteno. La picosidad (pungencia) se debe a la capsicina.

Subtipos de chile serrano

La variación morfológica con respecto al tipo de fruto, se ha clasificado por forma y tamaño en tres categorías o subtipos descritos por Laborde-Cancino y Pozo-Campodónico (1984):

Balín: frutos de dos a cuatro centímetros de longitud, de forma cónica o alargada, muy firmes y de poca aceptación en el mercado en fresco, en la actualidad tiene alguna aceptación en Veracruz para consumo en fresco. Sin embargo, la industria enlatadora tiene preferencia por este subtipo.

Típico: los frutos son alargados, de cuatro a ocho centímetros de largo, rectos, lisos, de ápice agudo o redondeado. Actualmente es el subtipo de mayor aceptación en el mercado para consumo fresco.

Largo: frutos con longitud mayor de ocho centímetros, son puntiagudos y encorvados. Este subtipo tiene poca aceptación en el mercado en fresco e industrial.

Calidad y características importantes en el mejoramiento del chile

En el chile serrano, la calidad se ha descrito en función de los siguientes aspectos:

Apariencia. Se prefieren frutos de seis a ocho centímetros de largo, rectos y de epidermis lisa, de color verde normal a verde oscuro brillante. El pedúnculo debe permanecer adherido al fruto para evitar una rápida deshidratación y los problemas de enfermedades en el almacenaje.

Firmeza. Es un carácter importante ya que confiere al fruto un mayor peso unitario, resistencia al transporte y mayor tiempo de exposición al mercado, sin que demerite su calidad. Este carácter está dado por un buen llenado por la placenta y semillas de las cavidades internas y por el grosor del pericarpio el cual no debe ser menor de 1.8 mm.

Pungencia. Se requiere que el fruto sea muy picante de buen sabor.

Greenleaf (1986) considera las siguientes características como importantes para el mejoramiento del chile.

Precocidad. Para medir esta característica se pueden clasificar los cultivares tomando la fecha de aparición de la primera flor. Otro método puede ser tomar el porcentaje de frutos maduros cosechados en determinada fecha. La herencia de la precocidad en diferentes cruzas se ha determinado como oligogénica.

Tamaño y forma del fruto. El tamaño y la forma del fruto se ha determinado que está gobernada por poligenes, con genes para fruto pequeño como dominante. Debido a que cerca de 30 genes determinan el tamaño de fruto, los frutos de mayor tamaño no pueden ser recuperados en la F_2 (Khambanonda, 1950). La característica de tamaño de chile grande se ha encontrado que está asociada con baja productividad, forma irregular y pobre calidad de fruto.

Selección para calidad. Una alta proporción de azúcar/acidez y características de sabor son lo que el fitomejorador desea incorporar en sus líneas mejoradas. La medición de sólidos solubles también es de utilidad. Se ha encontrado que la acidez del fruto se incrementa con la madurez en todos los cultivares. Pruebas de laboratorio para componentes del sabor, contenido

de pigmentos y niveles de vitamina C, pueden ser herramientas valiosas para seleccionar las mejores líneas avanzadas.

Sabor y pungencia del fruto. El sabor se debe a varias sustancias aromáticas presentes en pequeñas cantidades pero no relacionadas con la pungencia. La más alta concentración de sabor se encuentra en la pared exterior del fruto, con menor cantidad en la placenta y ninguna en la semilla. La pungencia se debe a la capsicina ($C_{18}H_{27}NO_3$). La distribución de la capsicina es alta en la pared interior, seguida por la placenta, semillas y pared exterior. El procesamiento industrial incrementa el contenido de capsicina, lo cual indica que durante el proceso se ha transformado un precursor en capsicina. Los cultivares de chile difieren grandemente en el nivel de capsicina.

Cultivares mejorados

Valadez-López (1996) presenta una forma general en que se clasifican los tipos de cultivares de chile mejorados los cuales se describen en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.2 Tipos de cultivares de chile mejorados.

Chiles dulces	Chiles picantes
California wonder 300	Serrano: Río verde, Huasteco 74
Yolo wonder L	Jalapeño: Jalapeño rayado, Jalapeño peludo
Yolo wonder 59	Pasilla: Pabellón
Early Gonder	Ancho: Esmeralda, Poblano, Criollo de S.L. de la Paz
Esmerald Gigant 488	Piquín: Criollo
Anaheim	

Debido a la amplia variabilidad genética que existe en México con respecto al chile serrano, la obtención de cultivares mejorados con buenas características agronómicas se han obtenido relativamente rápido. El método de mejoramiento empleado ha sido el de autofecundación, selecciones individuales, selección masal con el objeto de uniformizar los materiales. Los cultivares de chile serrano Altamira y Pánuco además de la calidad suprema de sus frutos son de alto rendimiento y también han mostrado un amplio rango de adaptación (Laborde-Cancino y Pozo Campodónico, 1984).

Pozo y Ramírez (1994) indican que el chile serrano dado su amplio rango de adaptación es uno de los principales cultivos hortícolas con mayor área sembrada (25 a 30 mil hectáreas) y de mayor consumo en fresco en el país, donde se estima una producción superior a 300 mil toneladas. Las enfermedades virales son los problemas de campo más constantes, bajo este contexto una de las estrategias es la obtención de cultivares precoces y de producción concentrada, características que aunadas a un manejo cultural de vectores, permite minimizar los riesgos de producción. La línea Serrano 2 y Chiser- 420 fueron sometidas a selección por varios ciclos a la infección natural de vectores de virus y dieron como resultado las líneas Serrano-2 (8m)-3-1 y Chiser-420(9m)-9-6(N) que fueron progenitores de Gigante Ebano y Paraíso, respectivamente. Ambos cultivares son uniformes y tienen frutos firmes, bien formados y de atractivo color. Gigante Ebano tiene frutos grandes (alrededor de 11 g) y Paraíso (alrededor de 8 g), tienen buen peso

específico, característica importante para la resistencia al transporte y mayor vida de anaquel.

Aguilar *et al.* (2007) efectuaron cruzas entre individuos de Chile [*C. chinense* (BG 3821) resistente a los Geminivirus PHV (Virus Huasteco del Chile) y Pep GMV (Virus del Mosaico Dorado del Chile) con susceptibles (Chile Serrano P8-60-3, entre otros) efectuando también la retrocruza hacia *C. annuum*, para recuperar el genoma de *C. annuum*. Estas enfermedades se encuentran ampliamente distribuidas en México y el sur Estados Unidos, el daño se estima en un 20 por ciento. La herencia de la resistencia a estos virus es de tipo dominante y fácil de transferir a través de un esquema de selección por retrocruzas asistido por marcadores moleculares. El objetivo de este trabajo es el de disponer de variedades de Chile con el rendimiento, calidad y características de sanidad competitivas con las semillas ahora disponibles. En la segregación de la RC_1F_1 , de la cruce (BG 3821 x *C. annuum*) x *C. annuum* se encontró que el 50 por ciento de los individuos son portadores de los genes asociados a la resistencia a estos virus y que son conferidos por BG 3821. El esquema de retrocruzas asistido por marcadores fue eficiente para identificar individuos portadores de genes de interés. En el programa de introgresión de genes, a partir de especies emparentadas, el conocimiento del genoma adyacente a los genes de interés, es importante para seleccionar en las primeras retrocruzas los individuos con el menor porcentaje de genoma recurrente indeseable.

Buenrostro *et al.* (2007) mencionan que actualmente no existen variedades comerciales de Chile con resistencia a geminivirus, los cuales afectan el rendimiento del Chile entre un 25 al 100 por ciento. Por lo tanto en este trabajo se estudió la co-segregación de la resistencia en poblaciones F₂ de las cruces entre plantas de Chile resistentes a geminivirus [*Capsicum chinense* Jacq (BG 3821) x las variedades comerciales susceptibles del tipo: Ancho, Puya, Serrano y Jalapeño] a nivel fenotípico y determinar su relación genotípica mediante marcadores genético-moleculares del tipo STS y RGAs. Esta información ayudará a incrementar la eficiencia en los programas de selección asistidos por marcadores moleculares y permitirá generar variedades de plantas de Chile resistentes a los geminivirus PHV y Pep GMV.

Oranday *et al.* (2007) evaluaron la actividad de toxicidad de Chile serrano, habanero y jalapeño sobre larvas de *Artemia salina*. El ensayo se considera predictivo y en forma general se usa como un estudio preliminar para la obtención de compuestos antitumorales; la toxicidad de compuestos en este crustáceo a tenido buena correlación con la actividad antitumoral en líneas celulares. Se probaron diferentes diluciones (25, 50, 100, 250 y 500 pp) de extractos metanólicos de frutos verdes y maduros de Chile habanero, jalapeño y serrano. El extracto que tuvo mayor actividad fue el de Chile habanero maduro.

Mata *et al.* (2007) comentan que el Chile verde serrano se produce prácticamente en todo el país, en diversos ciclos agrícolas y forma parte de

los productos hortícolas de exportación, aunque el 80 por ciento de la producción se consume internamente. El objetivo de este trabajo consistió en evaluar el efecto de cuatro soluciones nutritivas sobre la producción de la materia seca por etapa fenológica del cultivo, eficiencia de recuperación nutricional y rendimiento de chile serrano bajo condiciones de hidroponía, se utilizó el tipo de chile serrano (*C. annuum*) Cv. "Tampiqueño-74". Para la determinación de la producción de materia seca, se realizaron cinco muestreos destructivos de planta durante el desarrollo del cultivo. De los resultados obtenidos se observó que los valores de concentración de nitrógeno en la parte aérea de la planta variaron de 2.8 a 5.5 por ciento y en la hoja de 3.3 a 7.3 por ciento durante el desarrollo del cultivo. La absorción de nitrógeno fue $328 - 632 \text{ kg ha}^{-1}$, valores mayores que los reportados en otros tipos de chile. La solución nutritiva estándar con 4 dSm^{-1} de conductividad eléctrica ($\text{SNE}_{4\text{ds}}$), incrementó la producción de fruto de chile serrano en 55 por ciento, con respecto a $\text{SNS}_{75:25}$, lo que se atribuyó a la mayor concentración de iones K^+ , Ca^{2+} y NO_3^- en la solución nutritiva estándar.

Métodos de mejoramiento en autógamias

Un examen de los métodos por los cuales los cultivares de chile han sido desarrollados muestra que los siguientes han sido utilizados (Greenleaf, 1986). 1) Mejoramiento por pedigrí en la selección de cultivares superiores; 2) mejoramiento por pedigrí seguido de hibridación entre cultivares

superiores; 3) transferencia de genes simples de cultivares primitivos o formas silvestres a cultivares mejorados por retrocruzadas; 4) Intercruzadas entre diferentes familias de retrocruzadas con diferentes progenitores recurrentes de diverso germoplasma para combinar resistencia a varias enfermedades y nuevas características hortícolas.

El mejoramiento convencional de cultivares de Chile incluye la selección de individuos superiores de una población variable y la hibridación entre los progenitores seleccionados, seguida de selección por pedigrí o introducir caracteres en la población a través del mejoramiento por retrocruzadas. Para el mejoramiento de características cuantitativas se realizan generalmente cruces entre un número seleccionado de progenitores para iniciar un programa de mejoramiento general de la población (Greenleaf, 1986). Las características que se heredan cuantitativamente o aquellas cuya expresión depende de la acumulación de muchos genes, cada uno contribuyendo con pequeños incrementos a la expresión total, incluyen tamaño de fruto, rendimiento de fruto, contenido de carotenoides y condiciones de adaptación ambiental. Por lo que el fitomejorador debe poner en consideración: 1) que progenitores y cuantos progenitores debe de incluir en sus sistemas de apareamiento para mejorar la característica deseada; 2) como manejar la población combinada a través del programa de mejoramiento para incrementar la expresión de la característica deseada.

Las cruzas dialélicas ofrecen un medio para evaluar y seleccionar progenitores que pueden ser combinados para formar una población genéticamente variable. También se obtiene información sobre el control genético de la característica cuantitativa, lo cual es útil en la selección de procedimientos de mejoramiento que podrán ser efectuados para el mejoramiento deseado. Además, el esquema de cruzas dialélicas proporciona información sobre la heredabilidad y heterosis y los resultados pueden ser usados para predecir el comportamiento de poblaciones sintéticas que pueden ser formadas de varias combinaciones de progenitores.

Robles (1971) denomina heterosis al incremento en vigor resultado en ocasiones del cruzamiento entre dos progenitores endogámicos genéticamente diferentes; así mismo, algunos genetistas consideran a la disminución en vigor como heterosis negativa. Se describe también como el vigor híbrido por el cual un híbrido F_1 queda fuera del intervalo de sus progenitores respecto a uno o varios caracteres (rendimiento, tamaño de fruto, longitud y diámetro de fruto, etc.)

Varios diseños de apareamiento y esquemas de selección pueden ser utilizados para mejorar la expresión de características cuantitativas en poblaciones genéticamente variables. La selección recurrente es efectiva en características bajo control genético aditivo. Los individuos superiores identificados de una población original son intercruzados para formar una

población para el próximo ciclo de selección. La selección recíproca recurrente de hermanos completos proporciona una evaluación y selección simultánea dentro de poblaciones, utilizando una población como probador de la otra en cada ciclo de selección. Estos esquemas tienen la ventaja de mejorar las poblaciones para ambos efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE). Cada uno de estos programas de mejoramiento se han aplicado en cultivares autógamos tales como el chile (Greenleaf, 1986).

Modelos genéticos para el estudio de la aptitud combinatoria y heterosis

Obtención de ACG y ACE (Modelos de Griffing)

El concepto de aptitud combinatoria tiene gran importancia en el mejoramiento de plantas, y es especialmente útil cuando se desea comparar el comportamiento de líneas y su combinación híbrida (Griffing, 1956). Este procedimiento utiliza el sistema de cruzas dialélicas y produce un máximo de p^2 combinaciones. La técnica de cruzas dialélicas puede variar dependiendo del arreglo de progenitores utilizado en cada uno de los cuatro métodos propuestos por Griffing (1956).

Los términos de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) fueron originalmente propuestos por Sprague y Tatum (1942), siendo definidos como sigue (Griffing, 1956): El término de

ACG es utilizado para designar el comportamiento promedio de una línea en combinación híbrida, mientras que el término de ACE designa aquellos casos en el cual ciertas combinaciones se comportan relativamente mejor o peor de lo que podría ser esperado sobre la base del comportamiento promedio de las líneas incluidas. En el Modelo I de Griffing (1956) los progenitores constituyen la población, mientras que en el Modelo II los progenitores son una muestra de la población. La distinción entre los dos modelos es de importancia. En el Modelo I la estimación de los componentes de varianza no es apropiada, sino la estimación de los efectos de cada par de progenitores para las cruzas específicas (ACE) y para todas las cruzas que incluyen un progenitor en común (ACG). Los efectos estimados se aplican solo a los progenitores incluidos y pueden ser diferentes si estos son probados con otro grupo dialélico (Hallauer y Miranda, 1988).

Baker (1978) indica que en el análisis de un modelo fijo, los datos de las progenies de las cruzas simples del análisis dialélico es dividido en componentes relacionados a la ACG (efectos principales) y a la ACE (interacciones). Si el cuadrado medio de la aptitud combinatoria específica (ACE) no es significativo, se puede aceptar la hipótesis de que el comportamiento de las progenies de las cruzas simples, se puede predecir adecuadamente en base a la aptitud combinatoria general (ACG). Es decir, la progenie de las cruzas simples con mejor comportamiento será producida al cruzar los dos progenitores que tengan la más alta aptitud combinatoria general. Si por otro lado, los cuadrados medios de la aptitud combinatoria

específica son significativos, se deberá investigar la importancia de las interacciones (ACE), para determinar el comportamiento de las progenies de las cruzas simples.

Singh y Jain (1971) utilizaron la técnica de Griffing (1956) de Método II Modelo I para estimar la aptitud combinatoria en cinco variedades de *Phaseolus aerus* en características como rendimiento de grano, granos por vaina y número de vainas por planta. Los resultados indicaron que tanto los efectos de la aptitud combinatoria general como la específica fueron significativos e importantes en las tres características. Por lo que indican que ambos tipos de acción, tanto la génica aditiva como no aditiva están incluidas en todas las características evaluadas.

Los efectos de la aptitud combinatoria general y específica fueron estimados para cinco componentes del fruto de chile (*Capsicum annuum* L.) por Marin y Lippert (1975) en base al Método IV Modelo I de Griffing (1956), aplicable a una cruce dialélica con progenitores fijos. La variabilidad en los componentes del fruto entre los híbridos F_1 fue predominantemente atribuible a la aptitud combinatoria general (ACG), sugiriendo acción génica aditiva. Los cuadrados medios para aptitud combinatoria específica (ACE) no fueron significativos para ninguna de las características del fruto. La predominancia de los valores de la ACG sobre los valores de la ACE, sugieren que un programa de selección recurrente incorporando germoplasma de al menos

cuatro progenitores seleccionados en base al comportamiento de su ACG es una buena estrategia para el mejoramiento de la población.

Gritton (1975) estimó los efectos de la aptitud combinatoria general y específica y los efectos recíprocos en una cruce dialélica entre ocho cultivares de chícharo (*Pisum sativum* L.) obtenidos de acuerdo al Método III, Modelo I de Griffing (1956). La estimación de la ACG mostró ser muy importante para determinar el número de días a floración, pero no toda la variación fue atribuible a la aditividad, ya que los efectos de la aptitud combinatoria específica también fueron significativos. Por lo tanto, la floración está primeramente bajo el control de un simple sistema poligénico o aditivo, pero con considerable importancia de la ACE. Tanto la ACG como la ACE fueron importantes para determinar la altura de planta, por lo que este estudio mostró la importancia de la ACG y la ACE en la determinación de las características investigadas.

En un análisis de aptitud combinatoria en una cruce dialélica entre cinco progenitores del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum spp*) el cual se realizó con el Método IV, Modelo II de Griffing (1956) mostró que la estimación de los cuadrados medios para la ACG de las siete características evaluadas fue no significativa. Contrariamente, las estimaciones de los cuadrados medios de la aptitud combinatoria específica (ACE) fueron significativas para todas las características (Miller, 1977). Trabajos previos en caña de azúcar también han indicado que la ACE fue más importante que la ACG para

muchas características. La importancia de la ACE mostrada en este estudio sugiere que gran número de cruzas deben ser realizadas entre los clones parentales adaptados y evaluados para ACE a fin de identificar combinaciones parentales con alta ACE.

Nienhuis y Singh (1986) al analizar la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) en nueve cultivares de Dry Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) de acuerdo al Método IV (cruzas solamente), Modelo I (hijo) de Griffing (1956), encontraron que los cuadrados medios para la ACG fueron significativos para todas las características medidas. Además, los cuadrados medios de la ACE, aunque más pequeños que los correspondientes a la ACG, también fueron significativos para todas las características, excepto para semillas por vaina. Estos resultados sugieren que, aunque ambos tipos de acción génica aditiva y no aditiva están incluidos en la expresión del rendimiento, componentes del rendimiento y características de arquitectura de la planta, la acción génica aditiva es predominante.

Beck *et al.* (1991) señalan que la información sobre la aptitud combinatoria y los patrones heteróticos entre pools y poblaciones del CIMMYT es esencial para maximizar su uso en el desarrollo de híbridos. En este trabajo se utilizó el Método IV, Modelo II de Griffing (1956) para obtener estimaciones de los efectos de aptitud combinatoria general y específica para cada progenitor y sus cruzas respectivamente. Se observaron altos efectos de ACG para rendimiento en las poblaciones 42, 47 y 34. La craza

entre la población 33 x 45 fue la única que mostró efectos de aptitud combinatoria específica favorables para rendimiento.

Considerando la escasa información sobre los patrones heteróticos de las poblaciones de maíz para valles altos (Vasal *et al.*, 1995) efectuaron un análisis dialélico utilizando el Método II, Modelo I de Griffing (1956) para obtener los estimadores de la ACG y ACE para 12 fuentes de germoplasma de maíz adaptados a valles altos. Los resultados obtenidos indicaron que los materiales precoces, Pob. 85, Pob. 86 y PPH tuvieron la mejor ACG para rendimiento, pero todas ellas tendieron a producir progenies más tardías. De las cruzas entre materiales tardíos y tardío x precoz, el progenitor 12A presentó la mejor ACG para rendimiento. La mejor craza entre materiales blanco-tardíos fue la Pob 87 x Pool 12A con un valor de ACE de (0.55 t ha^{-1}) . La mejor craza de grano amarillo fue Pob 88 x Pool 13A con un valor de ACE de 0.45 t ha^{-1} .

Coyle y Smith (1997) estimaron la ACG y ACE para parámetros de calidad de fibra de algodón basados en el Método II, Modelo I de Griffing (1956), usando seis genotipos de algodón para el esquema de cruzas dialélicas. La ACG fue significativa para todas las características medidas, sugiriendo la acción génica aditiva para caracteres de calidad de la fibra y los componentes de rendimiento de estos seis genotipos. Sin embargo, también hubo acción génica dominante expresada en la significancia para la ACE en la mayoría de los caracteres medidos. Finalmente indican que entre estos

genotipos, los procedimientos de cruza triples, retrocruzas o selección recurrente pueden ser requeridos para la selección de la calidad de fibra y simultáneamente incrementar el número de fibras por unidad de superficie de la semilla.

Cheryld y Scott (1995) trabajando en el control del rasgado de la cutícula del fruto de jitomate, encontraron significancia ($p < 0.05$) para los efectos aditivos en todas las cosechas, mientras que los de dominancia fueron negativos y significativos ($p < 0.05$) en la cosecha tres, la cual fue sujeta de estrés alto, siendo la ACG significativa en todas las cosechas y la ACE solo en la tercera.

De La Cruz *et al.* (1999) al realizar análisis de varianza para ACG y ACE encontraron diferencias altamente significativas para ACE, siendo promisorio la formación de híbridos a través de cruzamientos específicos, no así para ACG. También observaron que conforme la diversidad genética de los padres se incrementa, la significancia para ACG y ACE sufre un incremento.

Estimación de parámetros de heterosis (Gardner y Eberhart)

Gardner y Eberhart (1966) por su parte proporcionan un modelo para estimar los efectos genéticos de las cruza dialélicas y poblaciones relacionadas en un conjunto de variedades de polinización libre, el cual sirve al fitomejorador como guía para el diseño y análisis de sus experimentos, de

tal manera que pueda obtener una máxima cantidad de información genética útil concerniente a un conjunto fijo de variedades.

Para la evaluación del progreso de la selección en seis poblaciones de maíz de la variedad Kitale Station, Eberhart y Harrison (1973) utilizaron el diseño descrito por Gardner y Eberhart (1966). Los resultados obtenidos indicaron que los efectos de heterosis (h_{ij}) no fueron significativos, lo cual sugiere que los cambios en las frecuencias génicas no fueron suficientes para producir heterosis significativa para rendimiento en las cruzas varietales entre el linaje original y los sublinajes relacionados. Por lo tanto, se considera que un gran número de loci con efectos pequeños puede haber sido incluido en el incremento del rendimiento obtenido.

Lippert (1975) efectuó un análisis dialélico (Análisis III de Gardner y Eberhart, 1966) utilizando nueve cultivares de chile (*Capsicum annum* L.), los cuales mostraron efectos significativos de heterosis (h_{ij}) para peso seco por planta, longitud de fruto y porcentaje de chile maduro a la cosecha. Los efectos aditivos (ACG) fueron más importantes que los no aditivos (ACE) para explicar la variabilidad entre las F_1 , para número total de frutos, peso seco de frutos por planta, longitud y diámetro de fruto y contenido total de carotenoides de los frutos. Se estimó el comportamiento predicho de poblaciones sintéticas formadas con progenitores seleccionados sobre la base de concentración de carotenoides, pero debido a que la heterosis para el peso total de fruto seco (uno de los primeros componentes del rendimiento

en Chile) fue significativo, lo cual indica que un programa diseñado para mejorar simultáneamente la acción génica aditiva y la no aditiva deberá mejorar ambas características. La selección recíproca recurrente o selección recíproca de hermanos completos están diseñadas para efectuar este tipo de mejoramiento simultáneo dentro del mejoramiento de poblaciones.

Singh y Paroda (1984) compararon cinco métodos de análisis dialélico utilizando datos de un grupo fijo de nueve variedades de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) y de la progenie de sus cruzas simples, señalando que los parámetros obtenidos utilizando los diferentes métodos se encuentran interrelacionados. De los cinco métodos considerados, el análisis combinado de Gardner y Eberhart (1966) proporcionó una mayor información y presentó las siguientes ventajas sobre los otros métodos:

1. Debido a que este modelo asume frecuencias génicas arbitrarias en todos los loci entre los progenitores, este es igualmente aplicable a un conjunto fijo de variedades homocigotos tanto como a aquellas de polinización libre.
2. Las medias varietales y sus cruzas pueden ser predichas, y si los efectos de heterosis específica (s_{ij}) y varietal (h_i) no son importantes, las medias de las cruzas varietales predichas tienen errores estándar más pequeños que las medias de las cruzas varietales observadas.
3. Las estimaciones de varios efectos genéticos de una craza dialélica y poblaciones relacionadas son definidos más claramente como funciones de frecuencias génicas y efectos aditivos y de dominancia

para loci individuales. Los efectos de heterosis son posteriormente subdivididos para proveer información adicional acerca de las variedades incluidas. Las estimaciones obtenidas son particularmente útiles para hacer predicciones y seleccionar materiales mejorados y métodos de mejoramiento.

4. Un análisis de varianza con pruebas de F apropiadas es proporcionado para varios tipos de acción génica incluidos.
5. Los efectos varietales, como son presentados por Gardner y Eberhart, dependen solo de la acción génica aditiva y aditiva x aditiva, prescindiendo de las frecuencias génicas o distribución génica correlacionada (Sokol y Baker, 1977).
6. La heterosis puede ser fácilmente calculada de las estimaciones obtenidas en este modelo, como $h_{ij} = 2s_{ij} - s_{ii} - s_{jj}/2$.

Finalmente enfatizan el hecho de que los datos de una cruce dialélica pueden ser completamente sumariados siguiendo el análisis combinado de Gardner y Eberhart.

Vasal *et al.* (1992) indican que la información sobre la aptitud combinatoria y patrones heteróticos de varios pools y poblaciones de maíz desarrollados en el CIMMYT es escasa, por lo cual su principal objetivo en esta investigación fue determinar los patrones heteróticos y la aptitud combinatoria entre pools y poblaciones subtropicales y de madurez precoz del CIMMYT. Dos poblaciones y cinco pools fueron seleccionadas para el

análisis dialéctico. El análisis III de Gardner y Eberhart (1966) fue utilizado para obtener estimaciones de la ACG y ACE. Este análisis es considerado superior al Método II, Modelo I de Griffing (1956) cuando los progenitores son variedades o poblaciones. Los resultados obtenidos indican que la varianza altamente significativa debida a la fuente de variación Progenitores vs. Cruzas (la cual es una medida de la heterosis promedio), puntualiza la importancia de los efectos génicos no aditivos en determinar el rendimiento de este germoplasma. La partición de la suma de cuadrados entre cruzas en la ACG y ACE mostró que el 92 y 88 por ciento de la variación puede ser atribuido a la ACG en ambientes subtropicales y templados respectivamente. Estos valores indican claramente la importancia relativa de los efectos genéticos aditivos para controlar la expresión del rendimiento en estos germoplasmas.

Widstrom *et al.* (1993) señalan que el desarrollo de modelos para determinar estimaciones estadísticas de aptitud combinatoria para líneas endocreadas (Griffing, 1956) y más tarde para estimar efectos de heterosis de datos de cruzas varietales (Gardner y Eberhart, 1966) resultaron en numerosas investigaciones para determinar heterosis y patrones heteróticos entre poblaciones de maíz. Los objetivos en este trabajo fueron identificar combinaciones de cruzas poblacionales con resistencia al ataque de insectos y que además muestren heterosis para características deseables. Doce poblaciones mejoradas de maíz previamente seleccionadas para mejorar la resistencia a insectos, fueron cruzadas en un análisis dialéctico, usando el

análisis II de Gardner y Eberhart (1966). La subdivisión de la heterosis en heterosis promedio, heterosis poblacional y heterosis específica (ACE, entre cruzas), reveló que la heterosis específica fue la que más contribuyó a la variación de la heterosis para todas las características, excepto para daño por insectos, en la cual la heterosis promedio fue una fuente de variación significativa.

Soriano (2000) analiza las restricciones del análisis II de Gardner y Eberhart (1966) e indica que los estimadores de los efectos de heterosis varietal, efectos de heterosis específica y sus varianzas, difieren del modelo no restringido. Sin embargo, algunos análisis utilizando el modelo no restringido y el de Gardner y Eberhart condujeron a las mismas inferencias que aquellas basadas sobre la evaluación de los efectos poblacionales expresados como desviaciones del valor promedio, la heterosis, la heterosis promedio y la heterosis varietal (la correlación entre los estimadores de los modelos es uno). El factor limitante para el uso del modelo no restringido es la falta de fórmulas para estimar las sumas de cuadrados y funciones de varianza. Finalmente concluye que es seguro seguir utilizando el modelo de Gardner y Eberhart en las evaluaciones de análisis dialélicos y señala que en un modelo aplicado, las hipótesis a probar en el análisis de varianza son:

1. $H_{0(1)}$: igualdad de las medias de tratamientos (progenitores y cruzas); probar esta hipótesis implica probar que no hay diferencias en las frecuencias génicas entre genotipos ($p_{ij} = p_i$ para toda i y j).

2. $H_{o(2)}$: igualdad de las medias de las poblaciones ($M_j = M$ para toda j) o igualdad de los efectos poblacionales ($v_j = \bar{v}$ para toda j) o nulidad de los efectos poblacionales expresados como desviaciones del efecto promedio ($v_j^* = 0$ para toda j); si la hipótesis $H_{o(1)}$ fue rechazada, probar esta hipótesis implica probar la igualdad de los efectos de poblaciones (con diferentes estructuras genéticas). El rechazo de $H_{o(2)}$ indica diferencias en frecuencias génicas entre los progenitores del dialélico, pero su aceptación no indica lo contrario.
3. $H_{o(3)}$: nulidad de heterosis; si hay diferencias en las frecuencias génicas entre poblaciones, probar esta hipótesis es equivalente a probar que no hay dominancia ($d_i = 0$ para alguna i).
4. $H_{o(4)}$: nulidad de la heterosis promedio; una prueba redundante en relación $H_{o(3)}$ debido a que los estadísticos están asociados con diferentes grados de libertad para el numerador.
5. $H_{o(5)}$: igualdad de la heterosis varietal ($H_j = H$ para toda j) o nulidad de los efectos de heterosis varietal ($H_j^* = 0$ para toda j); si hay diferencias entre las frecuencias génicas de los progenitores y si hay dominancia, probar esta hipótesis es probar que el grado de divergencia de cada población en relación a los otros progenitores del dialélico es una constante.
6. $H_{o(6)}$: igualdad de la heterosis específica ($S_{jj} = \bar{s}_{..} = -2H$ para toda j y j') o nulidad de los efectos de heterosis específica ($S_{jj}^* = 0$ para toda j y j'); si hay diferencias entre las frecuencias génicas de los progenitores y si hay dominancia, probar esta hipótesis es probar que

para todos los pares de poblaciones la magnitud de la divergencia entre ellas y los progenitores del dialélico es una constante.

Ali *et al.* (2001) utilizaron datos de siete características colectados de la cruce dialélica entre 11 variedades de Pearl Millet (*Penisetum glaucum* L.). Los datos fueron analizados usando el Método II, de Gardner y Eberhart (1966). Las poblaciones parentales (v_j) difirieron significativamente para ocho caracteres medidos y los efectos de heterosis (h_{ij}) fueron significativos para rendimiento de grano, días a floración y longitud de panícula. Los efectos de heterosis promedio (\bar{h}) solo fueron significativos para rendimiento de grano y días a floración, mientras que los efectos de heterosis varietal (h_j) y heterosis específica (S_{jj}) fueron significativos para días a floración, altura de planta, longitud de panícula y biomasa. Por lo tanto señalan que los efectos genéticos aditivos fueron generalmente tan importantes, sino más importantes, que la dominancia en el control de los caracteres agronómicos observados de este análisis dialélico. Además, indican que estos resultados probablemente se deben a los métodos de mejoramiento intrapoblacionales utilizados en el desarrollo de las poblaciones parentales estudiadas en este experimento, los cuales son más efectivos en utilizar la varianza genética aditiva que la debida a la dominancia, heterosis o epistasis.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El presente trabajo se puede dividir en dos etapas: la primera etapa fue la formación de los híbridos, la cual tuvo lugar en los invernaderos de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” (UAAAN), que se localizan en Buenavista, Saltillo, Coahuila. La segunda etapa fue la evaluación de los híbridos formados, la cual se realizó en el Campo Experimental del Sur de Tamaulipas (CESTAM), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Estación Cuauhtémoc, Tamaulipas, en la región conocida como “La Huasteca”.

Ubicación de los invernaderos

Los invernaderos en los cuales se formaron los híbridos, se encuentran dentro de la U.A.A.A.N., la cual se localiza en Buenavista, en Saltillo, Coahuila. La ubicación de los invernaderos es: Latitud 25°22´ Norte, Longitud 101°00´ Oeste, y una Altitud de 1743 msnm, con una temperatura media anual de 19.8°C.

Ubicación del campo de evaluación

El CESTAM se encuentra en el km 55 de la carretera Tampico-Mante, con las coordenadas: Latitud 22°34' Norte y Longitud 98°05' Oeste, y Altitud de 60 msnm, en la Huasteca al Nororiente de la República Mexicana. Esta región posee una temperatura media anual de 23°C.

Material genético

Se utilizaron cinco variedades de chile serrano, cada una de estas variedades fungió como progenitor al momento de realizar los cruzamientos. En el Cuadro 3.1 se muestran los materiales usados para la formación de los híbridos.

Cuadro 3.1. Progenitores empleados en los cruzamientos.

Número	Línea o Variedad	Tipo de chile
1	SER 1	Serrano
2	SER 2	Serrano
3	SER 3	Serrano
4	Paraíso	Serrano
5	Tampiqueño	Serrano

Siembra en charolas y trasplante en el invernadero

La semilla de los padres se sembró en charolas de unicel y, llegado el momento, se trasplantaron a los bancales del invernadero a dos plantas por

mata para después aclarar a una planta, dejando dos plantas por surco de cada progenitor a distancias de 50 cm entre surcos y entre plantas.

Esquema para la formación de cruzas

En la formación de las cruzas inter-varietales se cruzaron las variedades de chile serrano: SER1 x SER2, SER1 x SER3, SER1 x Paraíso, SER1 x Tampiqueño. SER2 x SER3, SER2 x Paraíso, SER2 x Tampiqueño, SER3 x Paraíso, SER3 x Tampiqueño y Paraíso x Tampiqueño. Para estas polinizaciones se siguió el diseño de apareamiento de Gardner y Eberhart (1966).

Siembra en charolas de la semilla híbrida

Después de haber hecho las cruzas correspondientes, se recolectaron los frutos y se les extrajo la semilla, la cual posteriormente se sembró en charolas de unicel nuevamente para que luego, llegado el momento, trasplantar a campo.

La siembra en campo fue en surcos de 1 m de ancho por 1 m de largo, 2 m entre surcos, trasplantando a doble hilera con una distancia entre hileras de 50 cm, y una distancia entre plantas de 25 cm, para tener 4 plantas por hilera y 8 por surco. Y todo esto para simular una densidad de población de

40,000 plantas por hectárea. La parcela útil fueron cuatro plantas centrales, buscando el supuesto de la competencia completa.

Diseño experimental

Para la evaluación de las cruzas y progenitores se empleó el diseño Bloques Completos al Azar con dos repeticiones, debido a la limitada cantidad de semilla.

El modelo matemático fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + v_{ij} + b_k + \varepsilon_{ijk}$$

$i, j = 1, 2, \dots, n$ (progenitores)

$k = 1, 2, \dots, r$ (repeticiones)

donde:

Y_{ijk} = Valor fenotípico observado

μ = Efecto de la media poblacional

v_{ij} = Efecto de i, j -ésimo genotipo

b_k = Efecto de bloques (repeticiones)

ε_{ijk} = Efecto del error correspondiente a la ijk -ésima observación

Diseño Genético

El Método experimental IV, Modelo I de Griffing (1956) que incluye solamente un grupo de cruzas dialélicas se utilizó para estimar la aptitud combinatoria general y específica.

El modelo para el análisis de aptitud combinatoria es:

$$X_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + b_k + e_{ijk}$$

$i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ (progenitores)

$k = 1, 2, \dots, r$ (repeticiones)

donde:

X_{ijk} = Valor fenotípico observado

μ = Media poblacional

g_i (g_j) = Efecto de la ACG del i, j -ésimo progenitor

s_{ij} = Efecto de la ACE del i -ésimo progenitor con el j -ésimo progenitor

b_k = Efecto de bloques (repeticiones)

e_{ijk} = Efecto del error correspondiente a la ijk -ésima observación

En el Cuadro 3.2 se presenta el análisis de varianza para la aptitud combinatoria.

Cuadro 3.2. Cuadrados medios del análisis de varianza para el Método IV, Modelo I de Griffing (1956).

F.V	G.L.	C. M.	E. C. M.
Repeticiones	$r-1$		
Cruzas	$[n(n-1)/2] - 1$	M_2	$\sigma^2 + rK^2$
ACG	$n-1$	M_{21}	$\sigma^2 + [r(n-2)/(n-1)] K^2$ ACG
ACE	$n(n-3)/2$	M_{22}	$\sigma^2 + [2r/n(n-3)] K^2$ ACE
Error	$r-1[n(n-1)/2] - 1$	M_1	σ^2

Los efectos de aptitud combinatoria general (g_i) y aptitud combinatoria específica (s_{ij}) pueden ser estimados como sigue:

$$\mu = \frac{2 X_{..}}{n(n-1)}$$

$$ACG = \hat{g}_i = \frac{1}{n(n-2)} (nX_{i.} - 2X_{..})$$

$$ACE = \hat{s}_{ij} = X_{ij} - \frac{1}{n-2} (X_{i.} + X_{.j}) + \frac{2}{(n-1)(n-2)} X_{..}$$

donde:

n = progenitores

$X_{i.}$ = suma de las cruzas que intervienen en el progenitor i

$X_{.j}$ = suma de las cruzas que intervienen en el progenitor j

X_{ij} = cruce entre el progenitor i y el progenitor j

$X_{..}$ = gran total

La estructura genética de las cuatro mejores cruzas para cada variable fue descrita en base al modelo:

$$X_{ij} = X_{..} + \hat{g}_i + \hat{g}_j + \hat{s}_{ij}$$

El análisis II de Gardner y Eberhart (1966) que incluye n progenitores y sus $n(n-1)/2$ cruzas varietales, se utilizó para estimar los efectos de heterosis.

La media para la población parental o la cruce es descrita por el modelo:

$V_j = M_v + v_j$ para progenitores

$Y_{jj'} = M_v + \frac{1}{2} (V_j + V_{j'}) + h_{jj'}$ para la progenie de las cruzas

donde:

M_v = Media de las variedades parentales

v_i = la desviación de M_v asociada con el i -ésimo progenitor

V_j = Efecto varietal de la j -ésima variedad

$h_{jj'}$ = Efecto de la heterosis cuando la variedad j se cruza con la variedad j'

El efecto de la heterosis ($h_{jj'}$) puede ser subdividido como sigue:

$$h_{jj'} = \bar{h} + h_j + h_{j'} + s_{jj'}$$

donde:

\bar{h} = heterosis promedio

h_j = heterosis varietal contribuida por la variedad j

$s_{jj'}$ = heterosis específica debida al cruzamiento de las variedades j y j'

En el Cuadro 3.3 se presenta el análisis de varianza de acuerdo al modelo descrito.

Cuadro 3.3. Cuadrados medios del análisis de varianza, bajo el Modelo II de Gardner y Eberhart (1966).

F.V	G.L.	C. M.
Repeticiones	r-1	
Genotipos	$[n(n+1)/2] - 1$	M_2
Variedades (v_j)	n-1	M_{21}
Heterosis ($h_{jj'}$)	$n(n-1)/2$	M_{22}
Promedio (h)	1	M_{221}
Varietal (h_j)	n-1	M_{222}
Específica ($s_{jj'}$)	$n(n-3)/2$	M_{223}
Error	$r-1[n(n+1)/2] - 1$	M_1

Para estimar los efectos varietales y de heterosis se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\mu_v = \text{media de todos los progenitores} = Y_v/n = \bar{Y}_v$$

$$V_j = \text{efecto de la variedad } j = Y_{jj} - \bar{Y}_v$$

$$h_{jj'} = \text{efecto de heterosis} = Y_{jj'} - \frac{1}{2} (Y_{jj} + Y_{j'j'})$$

$$= \bar{h} + \hat{h}_j + \hat{h}_{j'} + \hat{s}_{jj'}$$

Para subdividir $h_{jj'}$

i) Heterosis media

\bar{h} = heterosis promedio = media de todos los híbridos – media de todos los

$$\text{progenitores} = \bar{Y}_H - \bar{Y}_V$$

donde :

$$\bar{Y}_H = \text{promedio de cruzas}$$

$$\bar{Y}_V = \text{promedio de progenitores}$$

ii) Heterosis varietal

$$h_j = \text{heterosis varietal} = \frac{n-1}{n-2} (\bar{Y}_{hj} - \bar{Y}_H) - \frac{1}{2} (\bar{Y}_{jj} - \bar{Y}_V)$$

donde:

\bar{Y}_{hj} = promedio de las cruzas en que interviene el progenitor j

\bar{Y}_{jj} = promedio del progenitor j

n = número de progenitores

iii) Heterosis específica

$\hat{s}_{jj'}$ = heterosis específica

$$= \bar{Y}_{jj'} + \frac{n}{n-2} (\bar{Y}_H) - \frac{n-1}{n-2} (\bar{Y}_{hj} - \bar{Y}_{hj'})$$

donde :

$\bar{Y}_{jj'}$ = promedio de la craza entre el progenitor j y el progenitor j'

\bar{Y}_{hj} = promedio de las cruzas en que interviene el progenitor j

$\bar{Y}_{hj'}$ = promedio de las cruzas en que interviene el progenitor j'

La estructura heterótica de las cuatro mejores cruzas para cada variable fue descrita en base al modelo:

$$h_{jj'} = \bar{h} + h_j + h_{j'} + s_{jj'}$$

Variables evaluadas

Días a Inicio de Floración (DIF).- Se contaron los días que tardaron las plantas en tener el 50 por ciento de floración, comenzando la cuenta desde el día en que se trasplantó.

Días a Inicio de Cosecha (DIC).- Se contaron los días que tardaron las plantas en tener frutos listos para su corte en madurez comercial, comenzando la cuenta desde el día en que se trasplantó.

Altura de planta (AP).- Se tomó lectura de la altura desde la base de la planta hasta la parte más alta de la misma en centímetros.

Tamaño de fruto

Se tomó una muestra de 5 frutos por cada tratamiento, a los cuales se les tomaron datos de **Longitud de Fruto (LF)** y **Diámetro de Fruto (DF)** en centímetros.

Número Total de Frutos (NTF).- Se contaron los frutos totales por parcela.

Rendimiento (PTF).- Se tomó el rendimiento de fruto de las cuatro plantas centrales, para posteriormente transformar estos datos a toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los Cuadrados Medios del análisis dialélico (Método IV, Modelo I de Griffing, 1956) de las 10 cruzas de chile serrano se muestran en el Cuadro 4.1. Se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) y altamente significativas ($p \leq 0.01$) para los cuadrados medios de las cruzas en todas las variables evaluadas, excepto para altura de planta (AP). La significancia detectada para cruzas, permite que la subdivisión de los cuadrados medios sea válida (Marín y Lippert, 1975).

Los cuadrados medios para la Aptitud Combinatoria General (ACG) fueron significativos para todas las características, excepto para AP. Los cuadrados medios para la Aptitud Combinatoria Específica (ACE) fueron consistentemente más pequeños que los cuadrados medios para la ACG y fueron no significativos. Estos resultados sugieren que solo la acción génica aditiva está incluida y expresada en las características evaluadas. Los coeficientes de variación mostraron valores de 2.938 por ciento para DIC hasta 19.720 por ciento para AP.

Cuadro 4.1 Cuadrados medios de los análisis dialélicos de 10 cruzas de chile serrano evaluadas en la localidad de Cuauhtémoc, Tamaulipas en el ciclo 2006-2007.

F.V.	GI.	NTF	PTF	AP	DIF	DIC	LF	DF
REP	1	186.050	5678.45	5.000	1.800	5.000	0.179	0.0028
CRUZAS	9	2629.161*	421033.45*	163.355	45.355*	54.755*	1.425**	0.150**
ACG	4	3457.13*	785497.45**	215.05	61.55**	77.95**	2.755**	0.229**
ACE	5	1966.78	129467.65	121.20	32.40	36.20	0.360	0.087
ERROR	9	805.605	81096.23	98.00	9.022	12.00	0.113	.0098
C.V.		11.634	12.048	19.720	4.103	2.938	5.293	6.055

*, ** Significativo y Altamente significativo al nivel de probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente.

De acuerdo a los efectos de ACE (Cuadro 4.2) los mejores cruzamientos para NTF son: 1x4 (39.417*), 2x3 (37.417*), 4x5 (8.750) y 2x5 (6.250). Para la variable PTF las cruzas que obtuvieron los valores mas altos de ACE fueron: 2x3 (313.417), 1x4 (292.083), 3x5 (85.417) y 4x5 (50.417). Respecto a la variable AP las cruzas que obtuvieron los mejores valores de ACE fueron: 1x4 (9.667), 2x5 (7.667), 3x5 (3.833) y 1x3 (0.333).

En cuanto a la variable DIF se refiere, los mejores valores de ACE fueron para las cruzas: 1x5 (5.000**), 2x3 (4.667*), 2x4 (1.167) y 4x5 (1.333). En la variable DIC los mejores valores ACE fueron obtenidos por las cruzas: 1x5, 2x3 y 2x4 con valores de 5.333*, 5.167*, y 1.333 respectivamente.

En lo que a la variable LF concierne, las mejores respuestas para ACE fueron presentadas por las cruzas: 1x2, 3x4, 4x5 y 2x5 con valores de 0.323**, 0.257**, 0.177 y 0.043, respectivamente. Finalmente para la variable DF el mejor comportamiento para ACE fue el de las cruzas: 3x4, 2x5 y 1x2 con valores de 0.150**, 0.130** y 0.050 respectivamente.

Cuadro 4.2. Valores de ACG y ACE para cinco variedades de chile serrano y sus 10 cruzas para las características de rendimiento, fenológicas y tamaño de fruto.

Variedades	NTF total	PTF Kg ha⁻¹	AP cm	DIF días	DIC días	LF Cm	DF cm
ACG ₁	-13.933	371.133**	-4.267	4.900**	6.300**	0.492**	0.172**
ACG ₂	-21.433	-321.200*	7.400	0.567	-0.533	0.259**	0.072**
ACG ₃	12.567	71.633	-6.267	-0.933	-1.533	-0.288**	-0.141**
ACG ₄	-13.433	-428.367**	-2.100	-3.933**	-2.700	-0.575**	-0.075**
ACG ₅	36.233**	306.800*	5.233	-0.600	-1.533	0.112	-0.028
Cruzas							
ACE _{1x2}	-11.583	-21.083	-0.333	-2.667	-4.167*	0.323**	0.050
ACE _{1x3}	-17.083	-241.917	0.333	-0.667	-1.167	-0.110	0.043
ACE _{1x4}	39.417*	292.083	9.667	-1.667	0.000	-0.103	-0.063
ACE _{1x5}	-10.750	-29.083	-9.667	5.000**	5.333*	-0.110	-0.030
ACE _{2x3}	37.417*	313.417	-1.833	4.667*	5.167*	-0.037	-0.057
ACE _{2x4}	-32.083	-185.583	-5.500	1.167	1.333	-0.330**	-0.123**
ACE _{2x5}	6.250	-106.750	7.667	-3.167	-2.333	0.043	0.130**
ACE _{3x4}	-16.083	-156.917	-2.333	-0.833	-1.167	0.257**	0.150**
ACE _{3x5}	-4.250	85.417	3.833	-3.167	-2.833	-0.110	-0.137**
ACE _{4x5}	8.750	50.417	-1.833	1.333	-0.167	0.177	0.037

En resumen se puede observar que los progenitores P1 (SER 1), P5 (Tampiqueño) y P3 (SER 3) presentaron los más altos valores de ACG para rendimiento (PTF). Los progenitores P5 (Tampiqueño) y P3 (SER 3) también presentaron altos valores de ACG para número total de frutos (NTF). Las cruzas donde intervinieron estos progenitores mostraron altos valores de ACE para la variable PTF (1 x 4, 2 x 3, 3 x 5 y 4 x 5) y para la variable NTF (2 x 3, 2 x 5 y 4 x 5). Estos resultados coinciden con lo señalado por Lonquist (1965) de que la utilización efectiva de la varianza genética aditiva existente en cada una de las poblaciones de progenitores dará como resultado una mejoría no solo de su rendimiento individual, sino también del rendimiento de su cruce. Esto es evidente en el comportamiento de las cruzas intervarietales dialélicas en que las variedades de más alto rendimiento también fueron progenitores de las cruzas de alto rendimiento.

Respecto a la altura de planta (AP), los progenitores P2 (SER 2) y P5 (Tampiqueño) presentaron los valores más altos de ACG y quedaron incluidos entre las cruzas con valores más altos de ACE (1 x 4, 2 x 5 y 3 x 5) y por lo tanto estuvieron entre los de mayor altura. Para las variables días a inicio de floración (DIF) y días a inicio de cosecha (DIC), los progenitores P1 (SER 1) y P2 (SER 2) mostraron valores sobresalientes de ACG y formaron parte de las cruzas con alto valor de ACE (1 x 5, 2 x 3 y 2 x 4) quedando incluidos entre las cruzas más tardías. En lo referente a la longitud de fruto (LF) y diámetro de fruto (DF) los progenitores P1 (SER 1) y P2 (SER 2)

también fueron los de más alto valor de ACG, lo cual se reflejó en los frutos que presentaron mayor longitud y diámetro, quedando también incluidos en las cruzas con alto valor de ACE (1 x 2 y 2 x 5).

La estructura genética de una craza puede establecerse con base a los efectos de ACG (g_i, g_j) y de ACE (s_{ij}) de sus progenitores (Martín del Campo Valle y Molina, 1985).

En el Cuadro 4.3 se presenta la estructura genética de las mejores cuatro cruzas. En general se observa que en las cruzas que incluyeron progenitores con efectos de ACG alto x bajo, presentaron efectos positivos de ACE. Sin embargo, cabe destacar que para NTF la craza 1 x 4, la cual tuvo el efecto de ACE más alto, incluyó progenitores con efectos negativos de ACG y al considerar la craza 3 x 5 (la de más alto rendimiento para NTF, Cuadro 4.7) incluyó progenitores con efectos positivos de ACG , pero presentó un valor negativo de ACE. Esto puede significar que en la craza 1 x 4 que superó a la media de NTF con un valor de 12.05, esto se debió a los efectos no aditivos de la craza, mientras que para la craza 3 x 5 que superó a la media de NTF con un valor de 44.55, este se debió a los efectos aditivos de los progenitores.

Cuadro 4.3 Estructura genética de las mejores cuatro cruzas de cada variable de acuerdo al valor mas alto de ACE (\hat{S}_{ij})

Variable	Cruza	Y_{ij}	$\hat{\mu}$	\hat{g}_i	\hat{g}_j	\hat{S}_{ij}
NTF	1x4	256.000	243.950	-13.933	-13.433	39.417
	2x3	272.500	243.950	-21.433	12.567	37.417
	4x5	275.500	243.950	-13.433	36.233	8.750
	2x5	265.000	243.950	-21.433	36.233	6.250
	PTF	2x3	2427.500	2363.650	-321.200	71.633
1x4		2598.500	2363.650	371.133	-428.367	292.083
3x5		2827.500	2363.650	71.633	306.800	85.417
4x5		2292.500	2363.650	-428.367	306.800	50.417
AP	1x4	53.500	50.200	-4.267	-2.100	9.667
	2x5	70.500	50.200	7.400	5.233	7.667
	3x5	53.000	50.200	-6.267	5.233	3.833
	1x3	40.000	50.200	-4.267	-6.267	0.333
DIF	1x5	82.500	73.200	4.900	-0.600	5.000
	2x3	77.500	73.200	0.567	-0.933	4.667
	2x4	71.000	73.200	0.567	-3.933	1.167
	4x5	70.000	73.200	-3.933	-0.600	1.333
DIC	1x5	128.000	117.900	6.300	-1.533	5.333
	2x3	121.000	117.900	-0.533	-1.533	5.167
	2x4	116.000	117.900	-0.533	-2.700	1.333
LF	1x2	7.420	6.346	0.492	0.259	0.323
	3x4	5.740	6.346	-0.288	-0.575	0.257
	4x5	6.060	6.346	-0.575	0.112	0.177
	2x5	6.760	6.346	0.259	0.112	0.043
DF	3x4	1.560	1.626	-0.141	-0.075	0.150
	2x5	1.800	1.626	0.072	-0.028	0.130
	1x2	1.920	1.626	0.172	0.072	0.050
	1x3	1.700	1.626	0.172	-0.141	0.043

Las cruzas 3 x 5 y 1 x 5 (las de mayor rendimiento para PTF, Cuadro 4.7) incluyeron progenitores con altos efectos positivos de ACG, pero la cruza 1 x 5 presentó efectos negativos de ACE, por lo tanto el incremento al valor de 6.489 t ha⁻¹ con que la cruza 1 x 5 superó a la media se debió a los efectos

aditivos de los progenitores; La cruza 3 x 5 presentó un efecto positivo de ACE y superó a la media con un valor de 4.639 t ha^{-1} , actuando en este caso tanto los efectos aditivos como los no aditivos para el incremento en el PTF. Para altura de planta (AP), los progenitores de las cruzas 1 x 4 y 1 x 3 presentaron efectos negativos de ACG y en la cruza presentaron efectos positivos para ACE; sin embargo, cabe destacar que la cruza 1 x 3 presentó un valor reducido de altura de planta (40 cm), por lo que la reducción en la altura de planta de la cruza se debió a los efectos negativos de los progenitores. Por el contrario la cruza 2 x 5 presentó efectos positivos tanto de ACG para los progenitores como de ACE para la cruza, produciendo el valor más alto para altura de planta (70 cm), por lo que en esta cruza actuaron tanto los efectos aditivos como los no aditivos para el incremento de la altura.

En la variable días a inicio de floración (DIF) la cruza 1 x 5 fue la más tardía (82.5 días), resultado probablemente debido a los altos efectos positivos de ACG del P1 (SER 1) y el alto valor positivo de ACE de su cruza, por lo que tanto los efectos aditivos como los no aditivos estuvieron presentes en esta cruza. En contraste la cruza 3 x 4 (Cuadro 4.7) resultó la más precoz (67.5 días), presentando efectos negativos de ACG y ACE para sus progenitores y cruza respectivamente. Esta misma tendencia se dio para días a inicio de cosecha (DIC), en donde la cruza 1 x 5 fue la más tardía (128.0 días) y la cruza 3 x 4 fue la más precoz (112.5 días). En lo que a longitud de fruto (LF) concierne, la cruza 1 x 2 presentó efectos positivos de

ACG para los progenitores y de ACE para la craza. Similares resultados se obtuvieron para diámetro de fruto (DF), por lo que esta craza presentó el más alto valor de longitud de fruto (7.42 cm) y diámetro de fruto (1.92 cm), por lo cual en las dos características participaron tanto efectos aditivos como no aditivos. Por otro lado, la craza 3 x 4 presentó uno de los valores más reducidos de LF (5.74 cm) y de DF (1.56 cm), actuando en esta craza efectos negativos de ambos progenitores en ambas características.

Análisis de varianza modelo II de Gardner y Eberhart (1966)

Se realizó un análisis de varianza genética bajo el modelo II de Gardner y Eberhart (1966) para las variables consideradas, lo cual permitió conocer la diferencia existente entre los progenitores y sus cruza, así como los diferentes efectos de heterosis. En el Cuadro 4.4, se observan los cuadrados medios del análisis de varianza de las características evaluadas; observándose diferencias significativas ($p \leq 0.05$) y altamente significativas ($p \leq 0.01$) en la mayoría de las variables, excepto en AP en donde solo se detectó significancia en una fuente de variación. Los coeficientes de variación presentaron valores aceptables, encontrándose en un rango de 2.674 por ciento para DIC hasta 17.192 por ciento en AP.

Cuadro 4.4 Cuadrados medios del análisis de varianza de cinco genotipos de chile serrano y sus 10 cruzas para características de rendimiento, fenológicas y tamaño de fruto analizadas bajo el modelo II de Gardner y Eberhart (1966).

F. V.	G. L.	NTF	PTF	AP	DIF	DIC	LF	DF
Repetición	1	403.330	16333.333	000.000	8.533	0.138	0.194	0.003
Genotipos	14	2178.800*	374187.905*	141.890	67.657**	76.762**	1.972**	0.129**
Variedades	4	2314.014*	486165.179**	92.736	117.907**	112.393**	3.786**	0.287**
Heterosis	10	2082.710*	329936.995**	161.552	47.557**	62.509**	1.247**	0.066**
Het. Promedio	1	1848.150	779532.017**	6.666	21.600	19.266	0.375	0.011
Het. Varietal	4	2286.259*	468132.421**	250.714*	72.993**	106.456**	2.573**	0.054**
Het. Esp.	5	1966.783	129461.650	121.200	32.400**	36.000*	0.361	0.087**
Error	14	701.905	67247.333	73.500	6.676	9.848	0.138	0.009
C.V.		11.113	11.529	17.192	3.550	2.674	5.914	5.767

*, ** Significativo y Altamente significativo al nivel de probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente.

Para la fuente de variación genotipos (padres y sus cruzas) se encontraron diferencias significativas para las variables NTF y PTF y diferencias altamente significativas para DIF, DIC, LF, y DF, no detectándose significancia en AP, (la cual solo mostró significancia para la fuente de variación heterosis varietal). Para el efecto varietal (v_j) se observaron diferencias en frecuencias génicas entre los progenitores del dialélico para todas las variables, excepto para AP.

Los cuadrados medios para los efectos varietales (v_j) de las poblaciones contienen toda la variación debida a los efectos genéticos aditivos (Ali et al., 2001). Con respecto a los efectos de heterosis (h_{ij}) los resultados obtenidos indican que hay diferencias en las frecuencias génicas entre poblaciones y dominancia para todas las variables evaluadas, excepto para AP, lo que significa que las desviaciones debidas a la dominancia contribuyen a los valores genotípicos para todas las características excepto para AP.

Para la heterosis promedio (\bar{h}) se observaron diferencias altamente significativas solo para PTF, por lo que las desviaciones debidas a la dominancia contribuyen a los valores genotípicos individuales para rendimiento (PTF). Para la heterosis varietal (h_j) se observaron diferencias en las frecuencias génicas de los progenitores y dominancia, presentándose diferencias en el grado de divergencia de cada población en relación a los otros progenitores del dialélico en todas las características evaluadas.

Finalmente, con respecto a la heterosis específica (S_{ij}) se observaron diferencias en las frecuencias génicas de los progenitores y dominancia, presentándose diferencias en las magnitudes de divergencia entre pares de progenitores y entre ellas y los progenitores del dialélico para las características DIF, DIC y DF.

Los términos de heterosis en el análisis de Gardner y Eberhart (1966) son todos debidos a la dominancia y diferencias en frecuencias alélicas entre pares de poblaciones parentales (Ali et al., 2001).

Los resultados obtenidos en este análisis indican que al igual que en el análisis del Método IV, Modelo I de Griffing (1956), los efectos genéticos aditivos fueron importantes en el control de las características agronómicas observadas en este grupo de cruzas dialélicas. Se puede observar que el análisis II de Gardner y Eberhart (1966) a diferencia del Método IV Modelo I de Griffing (1956), maximiza la información sobre el comportamiento de las variedades y los efectos de heterosis, mientras el análisis de varianza de Griffing (1956) Método IV, no fue eficiente para detectar diferencias significativas para ACE (heterosis específica).

Por otra parte, Gardner (1966) señala que las constantes en el modelo de Gardner y Eberhart (1966), difieren de las de Griffing (1956) y que son más realistas en la terminología del mejoramiento de plantas. Sin embargo, cabe señalar que los efectos de ACE del Método IV Modelo I de Griffing son

equivalentes a los efectos de heterosis específica del Análisis II de Gardner y Eberhart (1966), así como lo han reportado Singh y Paroda (1984), Ovendeba *et al.* (1996) y Ali *et al.* (2001).

En el Cuadro 4.5 se observan valores positivos de heterosis promedio (variación debida a la diferencia promedio entre variedades y sus cruzas) en las variables evaluadas, lo cual indica la importancia de los efectos genéticos no aditivos para determinar estas características, principalmente para la variable PTF en la cual se detectó alta significancia en el análisis de varianza (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.5 Estimaciones de heterosis promedio (\bar{h}), varietal (h_j) y específica (s_{ij}) para las características de rendimiento, fenológicas y de tamaño de fruto bajo el modelo II de Gardner y Eberhart (1966).

Tipo de Heterosis	NTF	PTF	AP	DIF	DIC	LF	DF
\bar{h} prom.	16.65	341.95	1.00	1.8	1.7	0.15	0.026
h_1	-11.283	163.233	-0.667	5.850	7.150	0.390	0.052
h_2	-8.533	-209.100	12.000	-1.233	-2.183	0.327	0.062
h_3	18.967	117.483	-11.167	2.267	2.067	-0.930	-0.111
h_4	-32.033	-514.267	-3.500	-0.263	0.900	-0.057	-0.055
h_5	32.883	442.650	3.333	-6.650	-7.933	0.270	0.052
$S_{1 \times 2}$	-11.583	-21.083	-0.333	-2.667	-4.167*	0.323**	0.050
$S_{1 \times 3}$	-17.083	-241.917	0.333	-0.667	-1.167	-0.110	0.043
$S_{1 \times 4}$	39.417*	292.083	9.667	-1.667	0.000	-0.103	-0.063
$S_{1 \times 5}$	-10.750	-29.083	-9.667	5.000**	5.333*	-0.110	-0.030
$S_{2 \times 3}$	37.417*	313.417	-1.833	4.667*	5.167*	-0.037	-0.057
$S_{2 \times 4}$	-32.083	-185.583	-5.500	1.167	1.333	-0.330**	-0.123**
$S_{2 \times 5}$	6.250	-106.750	7.667	-3.167	-2.333	0.043	0.130**
$S_{3 \times 4}$	-16.083	-156.917	-2.333	-0.833	-1.167	0.257**	0.150**
$S_{3 \times 5}$	-4.250	85.417	3.833	-3.167	-2.833	-0.110	-0.137**
$S_{4 \times 5}$	8.750	50.417	-1.833	1.333	-0.167	0.177	0.037

El efecto de heterosis promedio (\bar{h}_1) es un indicador de la superioridad de los valores de las cruzas varietales sobre la media parental. En los resultados obtenidos se observaron valores positivos para todas las características, las cuales variaron de 0.026 para DF hasta 341.95 para PTF.

Respecto a la heterosis varietal el progenitor h_1 (Cuadro 4.5) mostró valores positivos en las variables PTF, DIF, DIC, LF y DF. El progenitor h_2 presentó valores positivos solo para las variables AP, LF y DF. Para las variables NTF, PTF, DIF y DIC se encontraron valores positivos para el progenitor h_3 . Referente al progenitor h_4 solo mostró un valor positivo para DIC. Con excepción de DIF y DIC los demás valores para el progenitor h_5 fueron positivos. En el análisis de varianza (Cuadro 4.4) se observó que los efectos de heterosis varietal (h_j) fueron de gran importancia comparados con los efectos de heterosis promedio y específica, e indican que el patrón heterótico de al menos una de las variedades difiere de los otros cuando se cruza con las variedades restantes (Hallauer y Miranda, 1988).

Los valores más altos para NTF fueron obtenidos por P3 (SER 3) y P5 (Tampiqueño) y para PTF por P1 (SER 1), P3 (SER 3) y P5 (Tampiqueño). Tres progenitores (SER 1, SER 3 y SER 4) tuvieron efectos para la reducción de AP. Los progenitores (SER 2, SER 4 y Tampiqueño) tendieron a reducir los días a inicio de floración (DIF) y los progenitores (SER 2 y Tampiqueño) tendieron a reducir los días a inicio de cosecha (DIC). Con respecto a la

longitud de fruto y diámetro de fruto (LF y DF) los progenitores SER 3 y SER 4 tuvieron una tendencia a reducir la longitud y el diámetro de fruto.

Cuando en el análisis de varianza los efectos de heterosis específica (s_{ij}) son significativos, indican que al menos una craza difiere de las otras debido a los efectos no aditivos y diferencias en frecuencias génicas. Los efectos de heterosis específica más favorables muestran que los mejores cruzamientos para NTF son: 1x4 (39.417*), 2x3 (37.417*), 4x5 (8.750) y 2x5 (6.250). Para la variable PTF las cruzas que obtuvieron los mejores valores de heterosis específica fueron: 2x3 (313.417), 1x4 (292.083), 3x5 (85.417) y 4x5 (50.417). Respecto a la variable AP las cruzas que obtuvieron los mas altos valores de heterosis específica fueron: 1x4 (9.667), 2x5 (7.667), 3x5 (3.833) y 1x3 (0.333). En cuanto a la variable DIF respecta, los valores de mayor magnitud de heterosis específica fueron para las cruzas: 1x5 (5.000**), 2x3 (4.667*), 2x4 (1.167) y 4x5 (1.333).

En la variable DIC los mejores valores de heterosis específica fueron obtenidos por las cruzas: 1x5, 2x3 y 2x4 con 5.333*, 5.167*, y 1.333 respectivamente. En lo que a la variable LF concierne, las mejores respuestas para heterosis específica fueron presentadas por las cruzas: 1x2, 3x4, 4x5 y 2x5 con valores de 0.323**, 0.257**, 0.177 y 0.043, respectivamente. Finalmente para la variable DF el mejor comportamiento para heterosis específica fue el de las cruzas: 3x4, 2x5, 1x2 y 1x3 con valores de 0.150**, 0.130**, 0.050 y 0.043, respectivamente.

La estructura heterótica de una craza dentro de un grupo dialélico se describe en base a tres tipos de heterosis: media, varietal y específica. La interpretación genética de la estructura heterótica de una craza es similar a la estructura dada por los efectos de ACG (Martin del Campo y Molina, 1985). En el Cuadro 4.6 se observa que en la mayoría de las cruzas entre progenitores que presentan heterosis varietal negativa x heterosis varietal positiva presentaron efectos de heterosis total ($h_{jj'}$) y heterosis específica ($s_{jj'}$) positivos.

Para NTF se observó que en la craza 1x4 la heterosis específica y la heterosis promedio fueron las que contribuyeron al valor positivo de la heterosis total ($h_{jj'}$) de la craza. Para PTF en la craza 3x5 tanto los efectos de heterosis varietal (h_{j_i}) como los de heterosis específica ($s_{jj'}$) contribuyeron al alto valor de la heterosis total ($h_{jj'}$).

En altura de planta (AP) se observa que los efectos de heterosis varietal y específica de la craza 2x5 contribuyeron al alto valor positivo de heterosis total, en contraste en la craza 1x3 se observaron valores negativos de heterosis varietal (h_{j_i}) que contribuyeron al valor negativo de la heterosis total ($h_{jj'}$).

Cuadro 4.6 Estructura de la heterosis de las mejores cuatro cruzas de cada s variable de acuerdo al valor más alto de heterosis específica ($\hat{s}_{jj'}$)

Variable	Cruza	$h_{jj'}$	\bar{h}	\hat{h}_j	$\hat{h}_{j'}$	$\hat{s}_{jj'}$
NTF	1x4	12.751	16.650	-11.283	-32.033	39.417
	2x3	64.501	16.650	-8.533	18.967	37.417
	4x5	26.250	16.650	-32.033	32.883	8.750
	2x5	47.250	16.650	-8.533	32.883	6.250
PTF	2x3	563.750	341.950	-209.100	117.483	313.417
	1x4	282.999	341.950	163.233	-514.267	292.083
	3x5	987.500	341.950	117.483	442.650	85.417
	4x5	320.750	341.950	-514.267	442.650	50.417
AP	1x4	6.500	1.000	-0.667	-3.500	9.667
	2x5	24.000	1.000	12.000	3.333	7.667
	3x5	-3.001	1.000	-11.167	3.333	3.833
	1x3	-10.501	1.000	-0.667	-11.167	0.333
DIF	1x5	6.000	1.800	5.850	-6.650	5.000
	2x3	7.501	1.800	-1.233	2.267	4.667
	2x4	1.471	1.800	-1.233	-0.263	1.167
	4x5	-3.780	1.800	-0.263	-6.650	1.333
DIC	1x5	6.250	1.700	7.150	-7.933	5.333
	2x3	6.751	1.700	-2.183	2.067	5.167
	2x4	1.750	1.700	-2.183	0.900	1.333
LF	1x2	1.190	0.150	0.390	0.327	0.323
	3x4	-0.580	0.150	-0.930	-0.057	0.257
	4x5	0.540	0.150	-0.057	0.270	0.177
	2x5	0.790	0.150	0.327	0.270	0.043
DF	3x4	0.010	0.026	-0.111	-0.055	0.150
	2x5	0.270	0.026	0.062	0.052	0.130
	1x2	0.190	0.026	0.052	0.062	0.050
	1x3	0.010	0.026	0.052	-0.111	0.043

Para DIF la cruza 1x5 mostró un alto valor positivo de heterosis específica ($s_{jj'}$) que contribuyó a que esta cruza fuera la más tardía y la de mayor

heterosis total. Esta misma tendencia se observó para variable DIC. Para LF la cruza 1x2 presentó valores positivos de heterosis varietal (h_{j_i}) y específica (s_{jj_i}) siendo la cruza con mayor longitud de fruto; en contraste, la cruza 3x4 presentó valores negativos de heterosis varietal (h_{j_i}) y fue la de menor longitud de fruto. La cruza 1x3 presentó valores positivos de heterosis para el progenitor P_1 y de heterosis específica (s_{jj_i}) para la cruza, ocupando el cuarto lugar con respecto al diámetro de fruto.

Cuadro 4.7 Medias de cinco variedades de chile serrano y sus 10 cruzas para las características de rendimiento, fenológicas y tamaño de fruto.

Variedades	NTF¹ (núm. fr.)	PTF (t ha⁻¹)	AP (cm)	DIF (días)	DIC (días)	LF (cm)	DF (cm)
1	222.00	24.375	42.00	69.50	114.50	6.40	1.84
2	201.50	17.975	40.00	75.00	119.50	6.06	1.62
3	214.50	19.300	59.00	65.00	109.00	7.48	1.54
4	264.50	21.935	52.00	64.00	109.00	5.16	1.56
5	234.00	17.500	53.00	83.50	129.00	5.88	1.44
Cruzas							
1x2	197.00	23.925	53.00	76.00	119.50	7.42	1.92
1x3	225.50	25.645	40.00	76.50	121.50	6.44	1.70
1x4	256.00	25.985	53.50	72.50	121.50	6.16	1.66
1x5	255.50	30.125	41.50	82.50	128.00	6.84	1.74
2x3	272.50	24.275	49.50	77.50	121.00	6.28	1.50
2x4	177.00	14.285	50.00	71.00	116.00	5.70	1.50
2x5	265.00	22.425	70.50	70.00	113.50	6.76	1.80
3x4	227.00	18.500	39.50	67.50	112.50	5.74	1.56
3x5	288.50	28.275	53.00	68.50	112.00	6.06	1.32
4x5	275.50	22.925	51.50	70.00	113.50	6.06	1.56
Media Var.	227.300	20.217	49.200	71.400	116.200	6.196	1.600
Media Cruzas	243.950	23.636	50.200	73.200	117.900	6.346	1.626

¹ Numero total de frutos de cuatro plantas

V. CONCLUSIONES

- El análisis dialélico de Griffing (1956), Método IV, Modelo I, mostró efectos altamente significativos para la Aptitud Combinatoria General (ACG) en todas las características evaluadas, excepto para altura de planta y no mostró significancia para la ACE, por lo que la acción génica aditiva fue la de mayor preponderancia para estas características.
- Los progenitores P1 (SER 1), P3 (SER 3) y P5 (Tampiqueño) presentaron altos valores de ACG para rendimiento (PTF) y formaron parte de las cruzas que mostraron altos valores de ACE. Las cruzas 3 x 5 y 1 x 5 fueron las de mayor rendimiento; ambas tuvieron progenitores con efectos positivos de ACG, pero la crusa 1 x 5 tuvo un efecto negativo de ACE, por lo que el aumento en el PTF se debió a los efectos aditivos de los progenitores. En la crusa 3 x 5 se tuvieron efectos positivos de ACE, por lo tanto en esta crusa actuaron tanto los efectos aditivos como los no aditivos en el incremento del PTF.
- Los progenitores P3 (SER 3) y P5 (tampiqueño) presentaron altos valores de ACG para número total de frutos (NTF) y se incluyeron en las cruzas con alto valor de ACE. La crusa 1 x 4 presentó el más alto

valor de ACE, pero los progenitores tuvieron efectos negativos de ACG, por lo tanto estos resultados indican que los efectos no aditivos incrementaron el NTF de esta cruce. Por el contrario, en la cruce 3 x 5 que fue la de mayor NTF, incluyó progenitores con efectos positivos de ACG, pero presentó un valor negativo de ACE, por lo cual este incremento en el NTF se debió a los efectos aditivos de los progenitores.

- Para altura de planta (AP), los progenitores P2 (SER 2) y P 5 (Tampiqueño) mostraron altos valores positivos para ACG y formaron parte de las cruces con altos valores de ACE. La cruce 1 x 3 presentó efectos negativos de ACG y un efecto positivo de ACE, además de obtener la menor altura de planta (40 cm), por lo tanto, los efectos negativos de los progenitores redujeron la altura de planta. Por el contrario, en la cruce 2 x 5 que obtuvo la mayor altura de planta (70 cm), presentando efectos positivos de ACG para sus progenitores y de ACE para la cruce, por lo que se asume la acción conjunta tanto de los efectos aditivos como de los no aditivos para incrementar la altura de planta.
- Respecto a las variables días a inicio de floración (DIF), días a inicio de cosecha (DIC), los progenitores P1 (SER 1) y P 2 (SER 2) presentaron altos valores de ACG y se incluyeron en las cruces que presentaron los mejores valores positivos de ACE para estas características. Para días a inicio de floración (DIF) la cruce 3 x 4 fue

la más precoz (67.5 días), presentando efectos negativos de ACG y de ACE para sus progenitores y su craza respectivamente. Una tendencia similar se observó para días a inicio de cosecha (DIC), donde la craza 3 x 4 fue la más precoz (112.5 días).

- Para longitud de fruto (L F) y diámetro de fruto (D F), en los progenitores P1 (SER 1) y P 2 (SER 2) se observaron altos valores positivos de ACG y se incluyeron en la craza 1x2 que presentó un alto valor positivo de ACE. Por lo tanto, en estas dos características participaron tanto efectos aditivos como no aditivos.
- El análisis de Gardner y Eberhart (1966) proporcionó una mejor separación de los efectos aditivos y de dominancia en el análisis dialélico efectuado con estos materiales, detectando significancia en las fuentes: variedades, heterosis promedio, varietal y específica para la mayoría de las variables evaluadas.
- La heterosis promedio fue positiva para todas las características mostrando alta significancia solo para rendimiento (PTF), resaltando la importancia de los efectos génicos no aditivos en determinar el rendimiento de este germoplasma.
- Para este caso en particular la heterosis varietal fue ampliamente importante en su contribución de la heterosis total para las características evaluadas. Tal es el caso de las poblaciones 5 (Tampiqueño) y SER 3, que presentaron la mayor divergencia con

respecto a NTF y para PTF las poblaciones 5 (Tampiqueño), SER 3, así como SER 1.

- En relación a la heterosis específica las poblaciones que presentan mayor divergencia entre si y en relación al grupo de progenitores son las cruzas 1 x 4, 2 x 3 y 4 x 5 para NTF; mientras que para PTF fueron las cruzas 2 x 3, 1 x 4, 3 x 5, y 4 x 5.
- Los efectos significativos para ACG detectados por el Método IV, Modelo I de Griffing (1956) y los efectos significativos para el efecto varietal (v_j) observados en el modelo II de Gardenr y Eberhart (1966) sugieren que la variación entre las cruzas fue principalmente debido a los efectos aditivos más que a los no aditivos, lo cual indica que estas características pueden mejorarse fácilmente mediante diversos procedimientos de selección intra e interpoblacional.

VI. RESUMEN

El cultivo del chile (*Capsicum annuum* L.) juega un papel económico de importancia a nivel mundial, tanto por la cantidad de empleos que genera como por sus enormes propiedades nutricionales en la dieta alimenticia. El chile es una buena fuente de vitaminas, particularmente ácido ascórbico en las clases de chiles dulces verdes y vitamina A en las clases de chile seco pungente. Además de su uso como alimento o condimento el chile también ha sido utilizado en la medicina y algunos son valiosos ornamentales. Actualmente se considera que existen cinco especies de chile cultivado, las cuales muestran gran diversidad en forma, tamaño y color de fruto. De estas especies *Capsicum annuum* es la más ampliamente cultivada y económicamente la más importante de las especies hoy en día.

Una de las técnicas biométricas utilizadas por los fitomejoradores para evaluar y caracterizar la variabilidad existente en las especies cultivadas es el análisis dialélico. El desarrollo de modelos para derivar estimaciones estadísticas de la aptitud combinatoria en líneas endocriadas (Griffing, 1956) y más tarde para estimar efectos de heterosis de datos de cruza varietales (Gardner y Eberhart, 1966) resultaron en numerosas investigaciones para determinar heterosis y patrones heteróticos entre poblaciones. En este

contexto, la evaluación de variedades de chile y sus cruzas es de gran importancia en el mejoramiento del chile serrano para determinar el potencial de las variedades como poblaciones mejoradas y evaluar la respuesta de las variedades diferentes esquemas de selección recurrente. Por lo tanto, los principales objetivos de la presente investigación fueron: 1) Estimar la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) de cinco genotipos de chile serrano y sus cruzas. 2) Estimar efectos de heterosis de los mismos materiales. 3) Efectuar la descripción de la estructura genética de las mejores cruzas en función de su rendimiento.

El germoplasma utilizado en la presente investigación consistió de cinco genotipos de chile serrano (SER 1, SER 2, SER 3, Paraíso, y Tampiqueño) y sus 10 cruzas posibles, evaluados bajo un diseño de Bloques Completos al Azar con dos repeticiones, las características agronómicas consideradas fueron: número total de frutos (NTF), peso total de frutos (PTF), altura de planta (AP), días a inicio de floración (DIF), días a inicio de cosecha (DIC), longitud de fruto (LF) y diámetro de fruto (DF). El experimento se estableció en el CESTAM que se localiza en el Km. 55 de la carretera Tampico-Mante, con coordenadas de: Latitud 22° 34' Norte y Longitud 98° 05' Oeste y Altitud de 60 msnm, en la Huasteca al Nororiente de la República Mexicana en el ciclo 2006-2007. Esta región posee una temperatura media anual de 23 °C. Para el estudio genético se utilizó el análisis dialélico propuesto por Griffing (1956), Método IV, Modelo I para la obtención de la ACG y ACE. El análisis propuesto por Gardener y Eberhart (1966) Método II se utilizó para estimar el

efecto varietal (v_j) y los efectos de heterosis total (h_{ij}), heterosis promedio (\bar{h}), heterosis varietal (h_j) y heterosis específica (s_{ij}).

Al efectuar los análisis estadísticos se determinó que los cuadrados medios del análisis dialélico (Método IV, Modelo I de Griffing, 1956) de las 10 cruzas de chile serrano mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) y altamente significativas ($p \leq 0.01$) para las fuentes de variación de cruzas y para los cuadrados medios de aptitud combinatoria general (ACG) en todas las características, excepto AP. Los cuadrados medios para aptitud combinatoria específica (ACE) fueron consistentemente más pequeños que los cuadrados medios para ACG y fueron no significativos. Los coeficientes de variación mostraron valores de 2.93 por ciento para DIC hasta 19.72 por ciento para AP.

Los progenitores P1 (SER 1), P5 (Tampiqueño) y P3 (SER 3) presentaron los valores más altos de ACG para rendimiento (PTF), los progenitores P5 (Tampiqueño) y P3 (SER 3) también presentaron altos valores de ACG para número total de frutos (NTF). Las cruzas donde intervinieron estos progenitores mostraron altos valores de ACE para la variable PTF (1x4, 2x3, 3x5 y 4x5) y para la variable NTF (2x3, 2x5 y 4x5). Para las variables DIF, DIC, LF y DF los progenitores P1 (SER 1) y P2 (SER 2) mostraron valores sobresalientes de ACG y formaron parte de las cruzas con alto valor de ACE.

La estructura genética de una cruce de un grupo dialélico se describió en base a los efectos de ACG (g_i, g_j) y de ACE (s_{ij}) de sus progenitores. Con respecto a la descripción de la estructura genética de las tres cruces con más alto rendimiento (PTF), se observó para la cruce 1x5 (30.125 t ha^{-1}) que los progenitores P1 y P5 mostraron efectos positivos de ACG, pero la cruce 1x5 tuvo un efecto negativo de ACE, por lo que el aumento en el PTF se debió a los efectos aditivos de los progenitores. La cruce 3x5 (28.275 t ha^{-1}) tuvo un efecto positivo de ACG para los progenitores P3 y P5 y un efecto positivo de ACE para la cruce por lo que se considera que en esta cruce actuaron tanto los efectos aditivos como los no aditivos en el incremento del PTF. La cruce 1x4 (25.985 t ha^{-1}) mostró un efecto positivo de ACG para el progenitor P1 y negativo para el progenitor P4, en la cruce 1x4 se observó un efecto positivo de ACE por lo tanto, también en esta cruce actuaron los efectos aditivos de un progenitor y efectos no aditivos de la cruce para el incremento en el PTF. Estas cruces superaron a la media de cruces que fue de $Mc = 23.336 \text{ t ha}^{-1}$.

En el análisis dialélico realizado bajo el Método II de Gardner y Eberhart (1966) se observaron diferencias significativas para los cuadrados medios de genotipos, efecto varietal (v_j) y heterosis total (h_{jj}') en todas las variables excepto AP. Para la heterosis promedio (h) se observaron diferencias altamente significativas solo para PTF. La heterosis varietal (h_j) presentó diferencias significativas para todas las variables y fue la de mayor importancia comparada con los efectos de heterosis promedio y específica.

Con respecto a la heterosis específica (s_{ij}) se observaron diferencias significativas solo para las características DIF, DIC y DF. Los coeficientes de variación presentaron valores aceptables, encontrándose en un rango de 2.67 por ciento para DIC hasta 17.19 por ciento para AP.

Los valores más altos de heterosis varietal (h_j) para NTF fueron obtenidos por P3 (SER 3) y P5 (Tampiqueño) y para PTF por P1 (SER 1), P3 (SER 3) y P5 (Tampiqueño). Los progenitores (SER 1, SER 3 y SER 4) tuvieron efectos para reducir la altura de planta. Los progenitores (SER 2, SER 4 y Tampiqueño) tendieron a reducir los días a inicio de floración (DIF) y los progenitores SER 2 y Tampiqueño también redujeron los días a inicio de cosecha (DIC). Con respecto a la longitud de fruto (LF) y diámetro de fruto (DF), los progenitores SER 3 y SER 4 tuvieron una tendencia a reducir la longitud y diámetro de fruto.

Con respecto a la estructura heterótica de las cruzas, se estableció en base a los tres tipos de heterosis: media (\bar{h}), varietal (h_j) y específica (s_{ij}), se observó para la craza 1x5 (30.125 t ha⁻¹) que la heterosis varietal de ambos progenitores y la heterosis promedio fueron las que contribuyeron al valor positivo de la heterosis total (h_{ij}). Para la craza 3x5 (28.275 t ha⁻¹) todos los efectos de heterosis contribuyeron al valor positivo de la heterosis total (h_{ij}). En la craza 1x4 (25.985 t ha⁻¹) excepto el progenitor P4, todos los efectos de heterosis contribuyeron al valor positivo de la heterosis total (h_{ij}).

Finalmente se puede concluir que el análisis de Gardner y Eberhart (1966) proporcionó una mejor separación de los efectos aditivos y de dominancia para el análisis dialélico realizado con estos materiales, detectando significancia en las fuentes de variación: variedades (v_j), heterosis promedio (\bar{h}), varietal (h_j) y específica (s_{jj}). Los efectos significativos para ACG detectados por el Método IV, Modelo I de Griffing (1956) y los efectos significativos para el efecto varietal (v_j) observados en el Método II de Gardner y Eberhart (1966) sugieren que la variación entre las cruzas fue principalmente debida a los efectos aditivos más que a los no aditivos, lo cual indica que estas características pueden ser mejoradas fácilmente mediante diversos procedimientos de selección intra e interpoblacional.

VII. LITERATURA CITADA

- Aguilar, M.R., S.M. Buenrostro, V.M. Álvarez, R.G. Guevara, R.F. Rivera, I. Torres, M.M. González, E. Villordo, J.L. Pons. 2007. Variedades de chile resistentes a geminivirus. Selección por retrocruza asistida con marcadores moleculares. Cuarta Convención Mundial del chile 2007. Memorias/Proceedings. Querétaro, Qro. México, del 15 al 17 de julio, 2007. pp 91-93
- Ali, A.M., C.T. Hash, A.E.S. Ibrahim, and A.G. Bhasker Raj. 2001. Population diallel of elite medium-and long-duration Pearl millet composites: I. Populations and their F₁ crosses. *Crop Sci.* 41: 705-711.
- Baker, R.J. 1978. Issues in diallel analysis. *Crop Sci.* 18: 533-535.
- Beck, D.L., S.K. Vasal, and J.Crossa. 1991. Heterosis and combining ability among subtropical and temperate intermediate-maturity maize germplasm. *Crop Sci.* 31: 68-73.
- Buenrostro, S.M., M.R. Aguilar, V.M. Álvarez, R.G. Guevara, R.F. Rivera, I. Torres, M.M. González, E. Villordo, J.L. Pons. 2007. Herencia de la resistencia a geminivirus en la generación F₂ de la cruce de *C. chinense* Jacq. x *C. annuum* L. Cuarta Convención Mundial del chile 2007. Memorias/Proceedings. Querétaro, Qro. México, del 15 al 17 de julio, 2007. p 101.
- Cheryld L. E. and J. W. Scoot. 1995. Diallel analysis for rain check in tomato; Gulf Coast Research and Education Center I FAS, Univ. of Florida, Hortscience. Vol. 30 (4). p. 772.
- Coyle, G.G. and C.W. Smith. 1997. Combining ability for within-boll yield components in cotton, *Gossypium hirsutum* L. *Crop Sci.* 37: 1118-1122.

- De La Cruz, E. L., E. Gutierrez del R., A. Palomo. G. 1999. Aptitud combinatoria para rendimiento de líneas de maíz en la Comarca Lagunera. XVIII Congreso Nacional de Fitogenética, p. 122.
- Eberhart, S.A. and M.N. Harrison. 1973. Progress from half-sib selection in Kitale Station Maize. East African Agricultural and Forestry Journal. 39 (1): 12-16
- Gardner, C.O. y S.A. Eberhart. 1966. Analysis and interpretation of the varity cross diallel and related populations. Biometrics. 22:439-452.
- Greenleaf, W.H. 1986. Pepper breeding. In. Basset, J. (Ed.). Breeding Vegetable Crops AVI Publishing Co. Inc. USA. Pp 67-127.
- Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Austr. Jour. Biol. Sci. 9: 463-493.
- Gritton, E.T. 1975. Heterosis and combining ability in a diallel cross of Peas. Crop Sci. 15: 453-457.
- Hallauer, A. R. and J. B. Miranda F. 1988. Quantitative genetics in maize breeding. The Iowa State University Press, Ames, Iowa. 468 p.
- Heiser, C.B. 1979. Peppers. In Evolution of Crop Plants. Ed. N. W Simmonds. Edinburgh School of Agriculture p. 339.
- Khambanonda, I. 1950. Quantitative inheritance of fruit size in red pepper (*Capsicum frutescens* L.). Genetics 35: 322-343.
- Laborde C., J. A. y O. Pozo C. 1984. Presente y pasado del chile en México. Publicación Especial No. 85. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos – Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. México, D. F. 80 p.
- Lippert, L.F. 1975. heterosis and combining ability in chili peppers by diallel analiysis. Crop Sci. 15: 323-325.

- Lonquist, J.H. 1965. Métodos de selección útiles para mejoramiento dentro de poblaciones. *Fitotecnia Latinoamericana*. 2: 1-10.
- Marin, O. and L.F. Lippert. 1975. Combining ability analysis of anatomical components of the dry fruit in chili pepper. *Crop Sci.* 15: 326-329.
- Martin del Campo, S. y J.D. Molina. 1985. Aptitud combinatoria, heterosis y estabilidad en tres grupos de poblaciones de maíz en el norte-centro de México. *Agrociencia*. 47-50: 103-116.
- Mata, H., R. Nuñez, J.L. Aguilar, E. Vázquez, P. Sánchez. 2007. Absorción de nitrógeno en chile serrano desarrollado en hidroponía. Cuarta Convención Mundial del chile 2007. *Memorias/Proceedings*. Querétaro, Qro. México, del 15 al 17 de julio, 2007. pp. 211-215.
- Miller, J.D. 1977. Combining ability and yield component analyses in a five-parent diallel cross in sugarcane. *Crop Sci.* 17: 545-547.
- Nienhuis, J. and S. P. Singh. 1986. Combining ability analyses and relationships among yield, yield components, and architectural traits in dry bean. *Crop Sci.* 26: 21-27.
- Oranday, A., M.L. Cárdenas, C. Rivas, C.M. Ramírez, Ma. De La Luz Flores, J.E. Vázquez, 2007. Actividad Biológica de extractos de chile (*Capiscum spp.*) habanero, jalapeño y serrano sobre *Artemia salina*. Cuarta Convención Mundial del chile 2007. *Memorias/Proceedings*. Querétaro, Qro. México, del 15 al 17 de julio, 2007. p 97.
- Ouendeba, B., W.W. Hanna, G. Ejeta, W.E. Nyquist, and J.B. Santini. 1996. Forage yield and digestibility of African pearl millet landraces in diallel with missing cross. *Crop Sci.* 36:1517-1520.
- Pozo C., O. y M. Ramírez M. 1994. Gigante Ébano y Paraíso. Nuevos cultivares de chile serrano en México. *In*. La genética en Latinoamérica. *Memorias IIº Congreso Latinoamericano de Genética, XV Congreso de Fitogenética*. Monterrey, Nuevo León, 25-30 septiembre 1994.

- Robledo, E. I. 2005. Potencial genético de cruzas inter-raciales en el mejoramiento de chile (*Capsicum annuum* L.). Tesis de Maestría en Ciencias. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Robles, S. R. 1971. Terminología Fitogenética y Citogenética. Herrero Hermanos Sucesores. Mexico, pp. 19 y 75.
- Singh , K.B. and B.P. Jain. 1971. Analysis of diallel cross in *P. aereus* Roxv. Theoretical and Applied Genetics. 41: 279-281
- Singh, O. and R.S. Paroda. 1984. A comparison of different diallel analyses. Theor. Appl. Genet. 67: 541-545
- Sokol, MJ. Baker RJ. 1977. Evaluation of the assumptions required for the genetic interpretation of the diallel experiments in self pollinated crops. Can. J. Plant Sci. 57: 1185-1191.
- Soriano, J.M. 2000. The parametric restrictions of the Gardner and Eberhart diallel analysis model: heterosis analysis. Genetics and Molecular Biology. 23: 869-875.
- Sprague, G. F. y L. A. Tatum. 1942. A general vs. specific combining ability in single crosses of corn. J. Am. Soc. Agron. 34: 923-932.
- Valadez-López, A. 1996. Producción de hortalizas. Ed. LIMUSA. Balderas 95. México, D.F.
- Vasal, S.K., G. Srinivasal, J. Crossa, and L. Beck. 1992. Heterosis and combining ability of CIMMYT's subtropical and temperate early-maturity maize germplasm. Crop Sci. 32: 884-890.
- Vasal S.K., G. Srinivasal, N. Vergara y F. González. 1995. Heterosis y aptitud combinatoria en germoplasma de maíz de valles altos. Rev. Fitotec. Mex. 18: 123-139.

Villalon, B. 1994. Ingeniería genética de resistencia a virus en Chile: mejoramiento tradicional complementado con biotecnología. *In*. La genética en Latinoamérica. Memorias II° Congreso Latinoamericano de Genética, XV Congreso de Fitogenética. Monterrey, Nuevo León, 25-30 septiembre 1994.

Widstrom, N.W., K. Bondari, and W.W. McMillan. 1993. Heterosis among insect-resistant maize populations. *Crop Sci.* 33: 989-994.