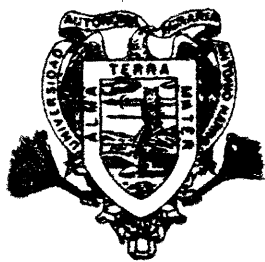


Comparación de Dos Metodologías para la Predicción del
Comportamiento de Híbridos y Estimación de Parámetros
Genéticos en una Población Enana de Maíz

ROSA GUERRERO CHAVEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS
EN FITOMEJORAMIENTO



Universidad Autónoma Agraria
"Antonio Narro"

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buнавista, Saltillo, Coah.

DICIEMBRE DE 2002



13771

BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONA
BANCO DE TES
U.A.A.A.N.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

COMPARACIÓN DE DOS METODOLOGÍAS PARA LA PREDICCIÓN
DEL COMPORTAMIENTO DE HÍBRIDOS Y ESTIMACIÓN DE
PARÁMETROS GENÉTICOS EN UNA POBLACIÓN ENANA DE MAÍZ

TESIS

Por

ROSA GUERRERO CHÁVEZ

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y
aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

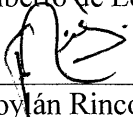
MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN FITOMEJORAMIENTO

Comité Particular

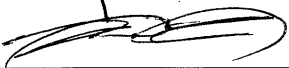
Asesor principal:

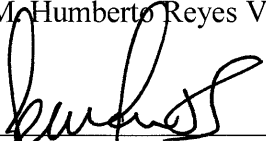

M.C. Humberto de León Castillo

Asesor:


Ph. D. Froylán Rincón Sánchez

Asesor:


Ph. D. M. Humberto Reyes Valdés


Dr. Jerónimo Landeros Flores
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre de 2002.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” por permitirme realizar los estudios de postgrado en esta institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico durante mi estancia en el postgrado.

Al M.C. Humberto de León Castillo por haberme dirigido y asesorado en la realización del presente trabajo.

Al Dr. Froylán Rincón Sánchez por su valiosa colaboración en el análisis estadístico e interpretación de resultados de la tesis, además de haber sido mi profesor en Maestría.

Al Dr. M. Humberto Reyes Valdés por su apoyo durante mi estancia en la maestría, así como sus acertadas observaciones y comentarios en la realización de este trabajo.

A todos los maestros y profesores del postgrado en Fitomejoramiento que tienen como objetivo transmitir cada día sus conocimientos a los alumnos.

A mis amigos y compañeros del postgrado en Fitomejoramiento: Ramiro, Alfredo, Roberto, Flavio, Eduardo, Erasmo, Silverio, Iván, Noe, Alberto, Bernardo, Chuy, Heriberto, Eulalio, Efraín, Héctor y Daniel por haberme brindado momentos agradables en su compañía.

Al Dr. Ernesto Preciado Ortiz y al M.C. Arturo Daniel Terrón por apoyarme en mi trabajo y en la realización de mi examen profesional.

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y dirigir mis pasos.

A mis padres Piedad Chávez Barragán y Raúl Guerrero Rodríguez por haberme apoyado incondicionalmente en la realización de la maestría.

En especial a mi madre quien acertadamente me ha guiado y educado a pesar de todas las dificultades que se le han presentado en la vida.

A mi hermana Guadalupe Guerrero Chávez quien ha sido mi mejor compañera y amiga.

A mi cuñado Juan Olivares Zavala y su familia por su apoyo en los momentos más importantes de mi vida y por brindarme su amistad.

COMPENDIO

Comparación de Dos Metodologías para la Predicción del Comportamiento de Híbridos y Estimación de Parámetros Genéticos en una Población Enana.

POR

ROSA GUERRERO CHÁVEZ

**MAESTRÍA EN
FITOMEJORAMIENTO**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DICIEMBRE 2002.**

M.C. Humberto de León Castillo - Asesor -

Palabras clave: *Zea mays* L., predicción de rendimiento, parámetros genéticos, aptitud combinatoria, heterosis.

En base a la diferencia de las fuentes de datos se realizó la comparación de dos metodologías para la predicción de rendimiento en híbridos simples, triples, y dobles. Las dos metodologías utilizadas fueron: Método B de Jenkins (PR1) y el método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR2).

Así mismo, se realizó la estimación de heterosis en cruzas dobles y de parámetros genéticos en cruzas simples.

El diseño estadístico fue Bloques Completos al Azar con dos repeticiones, evaluadas en dos localidades del Bajío. Se utilizó la metodología de modelos mixtos y el método del Mejor Estimador Lineal Insesgado (MELI), de igual forma, se utilizó el diseño IV de Griffing para la estimación de efectos genéticos en cruzas simples y dobles, para híbridos triples se utilizó el Diseño II de Carolina del Norte.

La predicción de rendimiento en los tres tipos de cruzas bajo el método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores obtuvo correlaciones significativas ($P \leq 0.01$) en cruzas simples con valores de $r = 0.534$ y significativas ($P \leq 0.05$) en cruzas triples y dobles con valores de $r = 0.528$ y 0.830 respectivamente.

El método B de Jenkins obtuvo correlaciones no significativas entre lo predicho y lo observado en cruzas triples y dobles ya que registro valores de $r = 0.263$ y 0.097 respectivamente.

En la estimación de parámetros genéticos de la población se observó que σ^2_A presenta un mayor valor que la σ^2_D (1.048 y 4.775 respectivamente), por lo que se recomienda aplicar un método de mejoramiento que permita explotar los efectos no aditivos.

Las cruzas dobles CS 3 x CS 5, CS 2 x CS 3 y CS 2 x CS 5 fueron las que presentaron mayor heterosis positiva con valores de 0.312, 0.240 y 0.231.

Las líneas L 2 y L 12 progenitoras de cruzas simples mostraron efectos significativos ($P \leq 0.01$) para rendimiento. En cruzas triples, las líneas L 3 y L 4, así como la craza simple CS 3 obtuvieron efectos positivos para ACG en rendimiento, y presentaron atributos adecuados para el resto de las variables. Así mismo, en cruzas dobles la craza simple CS 3 y CS 6 presentaron efectos significativos ($P \leq 0.01$) para rendimiento y además de mostrar características deseables para la mayoría de variables evaluadas.

Los híbridos con efectos significativos para ACE ($P \leq 0.01$) en la variable rendimiento fueron: En cruzas simples los híbridos L 1 x L 3, L 2 x L 10, L 2 x L 11, L 4 x L 7, L 4 x L 8, L 4 x L 9, L 4 x L 13, L 5 x L 10, L 6 x L 10, L 7 x L 11, L 7 x L 12 y L 9 x L 13, en cruzas triples el híbrido entre la craza simple CS 4 y la línea L 1 y en cruzas dobles, la combinación entre las cruzas simples CS 2 y CS 5.

ABSTRACT

Comparison of Two Methodologies for the Prediction of the Behavior of Hybrids and Estimate of Genetic Parameters in a Dwarf Population

BY

ROSA GUERRERO CHÁVEZ

MASTER OF SCIENCE
IN PLANT BREEDING

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DECEMBER 2002.

M.C. Humberto de León Castillo - advisor -

Key words: *Zea mays* L., yield prediction, genetic parameter, combining aptitude
and heterosis.

Based on different data sources the comparison between two methodologies for the yield prediction in single, three – way and double crosses was carried out. The two methodologies were: Method B of Jenkins (PR_1) and the sum of the general combining abilities of the parents (PR_2).

Likewise in double crosses the heterosis estimates were carried out, whereas variance components were estimated in single crosses.

The statistical design was random complete blocks with two replications, evaluated in two locations of the Bajío. The mixed model methodologies and the Best Linear Unbiased Estimate (BLUE) were used. Furthermore, the Griffing design IV was used to estimate genetic effects in single and double crosses, For the three – way hybrids was used design II of North Caroline.

The yield prediction in the three types of crosses with the sum of general combining abilities of the parents showed significant correlations ($P \leq 0.01$) in single crosses with values of $r = 0.534$ and significant ($P \leq 0.05$) in its three – way and double crosses with values of $r = 0.528$ and 0.830 respectively.

The B method of Jenkins gave non significant correlations among predicted and observed values in three-way and double crosses.

In the estimate of population's genetic parameters it was observed that σ^2_A was lower than σ^2_D (1.048 y 4.775 respectively), that means it is recommended to apply a improvement method that allows to exploit the no additive effects.

The double crosses CS 3 x CS 5, CS 2 x CS 3 and CS 2 x CS 5 present bigger positive heterosis with values of 0.312, 0.240 and 0.231.

The lines L 2 and L 12 that are parents of single crosses showed significant effects ($P \leq 0.01$) for yield. In Three – way crosses, the line L 3 and L 4, and the single cross CS 3 obtained positive effects for GCA in yield, and they presented appropriate attributes for the rest of the traits. Likewise, in double crosses the single cross CS 3 and CS 6 presented significant effects ($P \leq 0.01$) for yield and besides showing desirable characteristics for most of evaluated traits.

The hybrids with significant effects for ECA ($P \leq 0.01$) in the yield trait were: In single crosses, the hybrids L 1 x L 3, L 2 x L 10, L 2 x L 11, L 4 x L 7, L 4 x L 8, L 4 x L 9, L 4 x L 13, L 5 x L 10, L 6 x L 10, L 7 x L 11, L 7 x L 12 y L 9 x L 13. In three – way crosses, the hybrid among the single cross CS 1 and the line L 4. In double crosses, the combination among the single crosses CS 2 and CS 5.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS -----	xii
INTRODUCCIÓN -----	1
Objetivo general-----	2
Objetivos específicos-----	2
Hipótesis-----	3
REVISIÓN DE LITERATURA -----	4
Predicción de híbridos-----	4
Métodos de predicción-----	5
Aptitud combinatoria-----	10
Heterosis-----	11
MATERIALES Y MÉTODOS -----	14
Material genético-----	14
Ambientes de evaluación-----	16
Metodología-----	17
Criterios de validación-----	20
Estimación de heterosis-----	20
Variables evaluadas-----	21
Ajuste por covarianza-----	24
Diseño experimental-----	25
Diseño genético-----	27
Estimación de aptitud combinatoria-----	31
Estimación de parámetros genéticos-----	34
Estimación de varianzas y errores estándar-----	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	36
CONCLUSIONES -----	56
RESUMEN -----	58
LITERATURA CITADA -----	61

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
3.1	Líneas utilizadas para la formación de híbridos simples-----	15
3.2	Cruzas simples utilizadas para la formación de híbridos dobles-----	15
3.3	Líneas y cruzas simples utilizadas para la formación de híbridos triples-----	16
3.4	Estructura del análisis de varianza combinado para un diseño de Bloques Completos al Azar-----	26
3.5	Estructura del análisis de varianza combinado para el Diseño II de Carolina del Norte (DCNII)-----	28
3.6	Estructura del análisis de varianza combinado para el diseño IV de Griffing-----	30
4.1	Correlación entre el valor observado y el predicho bajo los métodos B de Jenkins (PR_1) y el calculado a través de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2) en cruzas triples.-----	38
4.2	Correlación entre el valor real observado y el predicho bajo los métodos B de Jenkins (PR_1) y el calculado a través de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2) en cruzas dobles-----	39
4.3	Cuadrados medios del análisis de varianza bajo el diseño IV de Griffing para las cruzas simples-----	41
4.4	Cuadrados medios del análisis de varianza bajo el Diseño II de Carolina del Norte para las cruzas triples-----	44
4.5	Cuadrados medios del análisis de varianza bajo el diseño IV de Griffing para las cruzas dobles-----	46

Cuadro		Página
4.6	Media de rendimiento y estimación de heterosis en cruzas dobles-----	47
4.7	Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria general para los progenitores de cruzas simples-----	48
4.8	Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria específica en cruzas simples-----	50
4.9	Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria general en las líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos triples-----	51
4.10	Estimación de la aptitud combinatoria general de las variables evaluadas en líneas y cruzas simples progenitoras de híbridos triples-----	52
4.11	Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria específica en cruzas triples-----	53
4.12	Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria general en cruzas simples progenitoras de híbridos dobles-----	54
4.13	Estimación de la aptitud combinatoria general de las variables evaluadas en cruzas simples progenitoras de híbridos dobles --	54
4.14	Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria específica en cruzas dobles-----	55

I. INTRODUCCIÓN

En los programas de mejoramiento genético de plantas, la predicción de híbridos juega un papel importante, ya que por medio de estos se puede conocer las mejores combinaciones de los progenitores para su formación además de su comportamiento, esto sin necesidad de realizar y evaluar una inmensa cantidad de cruza indeseables.

Mediante la evaluación de diferentes mecanismos para la predicción de híbridos, muchos mejoradores de plantas han coincidido en que el método B de Jenkins es el mejor, ya que toma como predictor la media de las posibles cruza no parentales. Sin embargo, en este trabajo se plantea la teoría en la cual la mejor predicción de híbridos simples, triples y dobles se obtienen a partir de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de sus verdaderos progenitores.

De la misma manera, es de interés en esta investigación determinar los efectos de la aptitud combinatoria general y específica de los materiales evaluados, así como los parámetros genéticos de la población de donde estos proceden y la heterosis de cruza dobles.

Objetivo General

Comparar el método B de Jenkins con el obtenido a través de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores para la predicción de híbridos simples, triples y dobles, cuantificar su heterosis para cruza dobles y estimar los parámetros genéticos de la población.

Objetivos específicos

- Predecir el comportamiento de híbridos simples, triples y dobles a partir de los métodos B de Jenkins y el basado en la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores.
- Comparar el comportamiento observado de los híbridos simples, triples y dobles con el predicho a través de las dos metodologías.
- Estimar los valores de heterosis de los híbridos dobles mediante la diferencia porcentual entre el rendimiento del híbrido y el promedio de sus progenitores.
- Estimar los componentes genéticos de la población enana.
- Estimar los efectos de la aptitud combinatoria general y específica.

Hipótesis

- La suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores es el mejor predictor de rendimiento en híbridos simples, triples y dobles.
- Existen líneas y cruzas simples que expresan efectos favorables de aptitud combinatoria general en cada uno de las variables evaluadas.
- Existen cruzas simples, triples y dobles que expresan altos efectos de aptitud combinatoria específica para rendimiento.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Predicción de híbridos

Existen métodos que permiten al fitomejorador de maíz predecir el comportamiento de las mejores combinaciones híbridas sin efectuar y probar literalmente miles de cruzas indeseables. Sin embargo, las combinaciones híbridas predichas deberán probarse exhaustivamente bajo condiciones de campo antes de que se pongan a producción comercial (Jugenheimer, 1990).

De los resultados de diversas investigaciones se ha obtenido una alta correlación entre los datos de predicción de rendimiento, con los datos obtenidos directamente de evaluaciones prácticas de campo, cuya manifestación justifica el empleo de la predicción por medio de computadoras para una rápida identificación de aquellos híbridos pronosticados como los de más rendimiento y solo estos se forman directamente en el campo (Robles, 1987).

Según Fehr (1983), la predicción de híbridos se debe realizar debido a que la evaluación de líneas puras para la producción de híbridos dobles y triples ha sido

impedido debido a número de combinaciones posibles de las cruzas, lo cual se puede determinar con las siguientes ecuaciones:

$$\text{No de híbridos simples} = n(n - 1)/2$$

$$\text{No de híbridos triples} = n(n - 1) (n - 2)/3$$

$$\text{No de híbridos dobles} = n(n - 1) (n - 2) (n - 3)/8$$

Métodos de predicción

Márquez (1988) informó sobre la eficiencia relativa de cuatro métodos propuestos por Jenkins (1934) para predecir el desempeño de híbridos de crusa doble.

Método (a): Promedio de las cruzas simples posibles (CS) entre las cuatro líneas de la crusa doble (CD). Si las líneas son A, B, C, D, entonces:

$$CD = [(A \times B) + (A \times C) + (A \times D) + (B \times C) + (B \times D) + (C \times D)]/6$$

Método (b): Promedio de las cuatro cruzas simples que no son progenitoras.

$$CD = [(A \times C) + (A \times D) + (B \times C) + (B \times D)]/4$$

Método (c): El rendimiento promedio de las cruzas obtenidas de las cuatro líneas con otras líneas (L) es decir, el promedio de sus aptitudes combinatorias generales con esas líneas

$$CD = [(A \times L) + (B \times L) + (C \times L) + (D \times L)]/4$$

Método (d): El rendimiento promedio de los mestizos obtenidos entre las cuatro líneas con un probador (P), o sea el promedio de sus aptitudes combinatoria generales con este probador.

El método b tiene la base genética más firme y proporciona información sobre el desempeño de las tres posibles combinaciones de crusa doble que incluyan cuatro líneas puras (Jugenheimer, 1990).

Jugenheimer (1990) señaló que los métodos a, c y d suponen una acción génica aditiva y que un gene aportado por cualquier línea producirá su efecto característico sin importar su orden de apareamiento. El método B permite el reconocimiento de los efectos no aditivos que se originan de la dominancia, la epistasis, etc.

Castro (1989) seleccionó 17 progenitores en cuatro áreas geográficas del país con las cuales fueron formadas 136 cruzas según el método 4 de Griffing y evaluados en seis ambientes, se estimó la aptitud combinatoria para identificar las mejores cruzas por su rendimiento y valores altos de ACE. Las cruzas con efectos altos de ACE y alto

rendimiento fueron aquellos formados con ambos progenitores de efectos positivos para ACG, en base a esto, se predijeron 30 cruzas triples y 59 cruzas dobles con el Método B de Jenkins y obtuvieron una media de rendimiento de 6.839 t ha^{-1} para los dos casos.

Gutiérrez (1987) tomó en cuenta las cruzas de prueba con comportamiento sobresaliente para cada ambiente individual, e hizo la predicción de híbridos de tres y cuatro elementos para cada ambiente por separado (trópico húmedo y trópico seco) con la finalidad de aprovechar la adaptación de determinados materiales en ambientes específicos. Por otra parte, identificó las cruzas prueba con mejor comportamiento a través de ambientes y de igual manera predijeron cruzas híbridas.

López (1976) realizó los cruzamientos posibles entre 8 líneas super – enanas endocriadas a un nivel S_4 . Una vez efectuados dichos cruzamientos se evaluó la progenie en ensayos de rendimiento para en base a este predecir cruzas triples y dobles, así como la ACG y la ACE. Como resultado de estos estudios, observó que la línea que presentaba mayor ACG intervenía en las mejores cruzas triples y dobles predichas.

Lugo (1993) realizó predicciones de híbridos dobles a través de la prepotencia de los híbridos simples. El modelo usado para obtener la prepotencia de las cruzas simples consistió en sumar y promediar los valores observados obtenidos por las cruzas dobles, donde participó la craza simple en el análisis ya sea como hembra o como macho. Además predijo el comportamiento de los híbridos dobles sumando y promediando las prepotencias de dos cruzas simples seleccionadas para generar el híbrido doble.

Lo anterior permitió separar las buenas y malas prepotencias por rendimiento y que a partir de ellas se realizaron predicciones del comportamiento de híbridos dobles, demostrando colateralmente que cruza simples de buena prepotencia forman híbridos buenos y viceversa, por lo que el autor infirió que el desempeño de las cruza dobles están en función principalmente de los efectos aditivos, además de los efectos no aditivos propios de las cruza simples progenitoras.

Salmeron (1984) predijo y evaluó 44 híbridos triples y 24 híbridos dobles por el método B de Jenkins y obtuvo como resultado de este estudio que en general no existía concordancia entre los valores predichos y los observados, sin embargo justificó estos resultados debido a la interacción genotipo – ambiente.

Tijerina (1995) comprobó que en la predicción de híbridos bajo el método B de Jenkins no existía correlación de lo predicho con lo observado, no obstante obtuvo una buena correlación cuando predijo el comportamiento de los híbridos dobles por medio de la suma y promedio de las prepotencias de las cruza simples implicadas.

Villasana (1998) predijo el comportamiento de híbridos triples y dobles para dos localidades mediante el método B de Jenkins. Estas cruza fueron predichas en base al rendimiento y a que varias líneas participan en la formación de híbridos comerciales, las cuales tienen una alta capacidad de combinación (ACG) y respuesta agronómica en sus progenies.

Preciado y Colaboradores (2001) predijeron el comportamiento de cruza triples a partir de un análisis conjunto de rendimiento de un grupo de cruza simples formado con líneas de QPM liberadas por el CIMMYT que fueron evaluadas en diversas localidades durante 1997 y 1998. El comportamiento de las cruza triples predichas fue evaluado en 40 localidades tropicales y subtropicales durante el ciclo Primavera – Verano 1999. Los resultados revelan que algunas cruza triples predichas mostraron rendimientos similares a las cruza simples de QPM y a testigos comerciales normales. Los híbridos que mostraron mayor adaptación a través de localidades fueron los que involucraron cruzamientos entre líneas tropicales y subtropicales. Se observaron rendimientos de hasta 9 y 17 t ha⁻¹ en regiones tropicales y subtropicales respectivamente.

Quemé (1989) realizó predicciones de rendimiento de grano bajo el método B de Jenkins en cruza dobles y triples a partir de la información de cruza simples evaluadas en 1986 y 1977. Las predicciones obtenidas fueron correlacionadas con los rendimientos reales de 1987 obteniendo correlaciones no significativas en la predicción de cruza triples y significativa en dos de cuatro localidades evaluadas en cruza dobles cuando la comparación de lo predicho y lo evaluado fue en el mismo año y no significativa en todas las localidades cuando se realizó en diferentes años.

Fuentes y colaboradores (1994) establecieron ensayos con 49 tratamientos (45 cruza y 4 testigos) en un diseño de látice triple 7 x 7 a través de localidades en Guatemala, México y Nicaragua. Además obtuvieron valores de ACG y ACE a través del diseño IV de Griffing y predijeron híbridos dobles y triples que superaron

teóricamente hasta en 8 y 11 por ciento al testigo. Sin embargo dichos autores sugieren que estos sometán a evaluaciones a través de ensayos para verificar los resultados.

Larios y Colaboradores (1992) realizaron un ensayo dialélico de diez líneas élite de grano blanco cuyas cruza simples se evaluaron en seis localidades de Centro América y a partir de estos se realizaron predicciones de rendimientos de 20 cruza dobles a través del método B de Jenkins en donde se obtuvieron valores predichos de hasta 6.96 t ha^{-1} .

Aptitud combinatoria

Puesto que la formación de líneas homocigóticas tiene como objetivo final encontrar combinaciones altamente eficientes para producir variedades híbridas comerciales, la prueba final para predecir qué líneas han de usarse comercialmente es la aptitud combinatoria, medida a través de la mayor productividad de los híbridos resultantes (Brauer, 1969).

Las aptitud combinatoria general es el desempeño promedio de una línea en algunas combinaciones híbridas. La aptitud combinatoria general proporciona información sobre qué líneas puras deben producir los mejores híbridos cuando se cruzan con muchas otras líneas. La aptitud combinatoria específica es el desempeño individual de una línea pura en combinación híbrida específica (Jugenheimer, 1990).

En un programa de desarrollo de híbridos, el objetivo es identificar una nueva línea, la cual cruzada con otra línea producirá híbridos superiores. La habilidad combinatoria se refiere al potencial de una línea para producir híbridos superiores. La habilidad combinatoria general se refiere a la media de la actuación de una línea en cruza con otras líneas. Habilidad combinatoria específica es la actuación de una línea en cruzamiento con otra línea específica (Fehr, 1983).

En la evaluación de líneas puras para su uso en mejora de alógamias se valoran estas para caracteres de tipo morfológico, patológico, etc; pero además se valoran por su capacidad de producir híbridos cuando se les cruza una con otras. Dicho carácter se denomina aptitud combinatoria (AC), de la que interesan dos tipos. La aptitud combinatoria general (ACG) de una línea pura concreta, es su valor para formar híbridos con cualquier otra (tendrá una ACG alta si el promedio de sus híbridos con otra línea es alto) y la aptitud combinatoria específica (ACE) de las dos líneas puras concretas es el valor del híbrido entre ambas (Cubero, 1999).

Heterosis

La heterosis es el fenómeno en virtud de la cual la cruza (F_1) entre dos razas, dos variedades, dos líneas, etc, producen un híbrido que es superior en tamaño, rendimiento o vigor en general. Algunos investigadores hablan de heterosis cuando F_1 es superior en vigor al comportamiento medio de sus progenitores; otros consideran como una heterosis cuando F_1 es superior al vigor del mejor progenitor y tiene por consiguiente mayor importancia económica (Reyes, 1985).

El vigor híbrido o heterosis puede ser considerado el fenómeno inverso a la degradación que acompaña a la consanguinidad, sin embargo, el efecto beneficioso de la hibridación es un fenómeno mucho más conocido que el de la depresión debido a la consanguinidad porque se observa en casi todos los híbridos F_1 entre genitores no relacionados (Allard, 1980).

Según Reyes (1985), la heterosis produce un estímulo general en la progenie o el híbrido y afecta a las variedades de diferente manera y en general se manifiesta de la siguiente manera: Mayor rendimiento de grano, forraje o frutos; madurez más temprana; mayor resistencia a plagas y enfermedades; plantas más altas; aumento en el tamaño o número de ciertas partes u órganos de la planta; incremento de algunas características internas de la planta.

Según Robles (1987), para evaluar la heterosis se cuantifica en porcentaje considerando la relación entre la F_1 con el promedio de sus progenies, de acuerdo a las formulas que enseguida se exponen:

$$1. \text{Heterosis} = \frac{\frac{F_1}{P_1 + P_2}}{2} \times 100$$

$$2. \text{Heterosis} = \frac{F_1 - \frac{(P_1 + P_2)}{2}}{\frac{P_1 + P_2}{2}} \times 100$$

$$3. \text{Heterosis} = \frac{F_1 - P_1}{P_1} \times 100$$

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

El material genético consistió en la evaluación de 78 cruzas simples, 21 cruzas dobles y 25 cruzas triples procedentes de una población enana, con el objetivo de comparar los valores reales obtenidos con los predichos, usando dos metodologías: La suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores y el método B de Jenkins.

Los híbridos simples y dobles fueron formados a partir de las cruzas posibles entre trece líneas y siete cruzas simples respectivamente (Cuadro 3.1 y 3.2) bajo el modelo IV de Griffing (Griffing, 1956), dando origen a 78 híbridos simples y 21 híbridos dobles. Los híbridos triples fueron obtenidos a través del apareamiento de cinco líneas y cinco cruzas simples (Cuadro 3.3) en un diseño II de Carolina del Norte (DCNII) (Comstock y Robinson, 1948), originando 25 cruzas triples.

Una parte de las cruzas simples fueron formadas en Tepalcingo, Mor. en el ciclo O – I' 98/99 y el resto, al igual que en el caso de los híbridos dobles y triples se llevaron a cabo en este mismo lugar durante el ciclo O – I '00/01. La siembra se realizó de tal

manera que cada progenitor se sembró en un surco de 5 m depositando dos semillas por golpe.

Cuadro 3.1. Líneas utilizadas para la formación de híbridos simples.

N° de línea	Genealogía
1	232 - 10 - 11 - 1 - A - A
2	MLS4 - 1
3	LBCPC5F1 - 2 - 4 - 1 - #
4	LBSMPSMC5S4 - 1 - 2
5	LBCPC2 - 1 - 1 - 1 - A - A - 1 - X
6	LBCPC5F17 - 3 - 5 - 1
7	255 - 18 - 19 - 60 - A - A
8	LBSMPSMC5S4 - 1 - 1
9	LBMPSMC5S2 - 1
10	LBCPC4S4 - 1
11	LBCPC4S4 - 2
12	LBCPC4S4 - 3
13	LBMPSMC5S2 - 2

Cuadro 3.2. Cruzas simples utilizadas para la formación de híbridos dobles.

Cruza simple	Genealogía
1	LBSMPSMC5S4 - 1 - 2 * LBCPC4S4 - 3
2	LBCPC4S4 - 3 * LBCPC5F17 - 3 - 5 - 1
3	LBSMPSMC5S4 - 1 - 1 * LBCPC4S4 - 1
4	255 - 18 - 19 - 60 - A - A * LBSMPSMC5S2 - 1
5	232 - 10 - 11 - 1 - A - A * LBSMPSMC5S4 - 1 - 2
6	LBCPC5F1 - 2 - 4 - 1 - # * MLS4 - 1
7	LBCPC2 - 1 - 1 - 1 - A - A - 1 - X * LBSMPSMC5S2 - 2

Cuadro 3.3. Líneas y cruza simples utilizadas para la formación de híbridos triples.

N° de línea o cruza simple	Genealogía
1	232 – 10 – 11 – 1 – A – A
2	MLS4 – 1
3	LBCPC5F1 – 2 – 4 – 1 – #
4	LBSMPSMC5S4 – 1 – 2
5	LBCPC2 – 1 – 1 – 1 – A – A – 1 – X
1	LBSMPSMC5S4 – 1 – 2 * LBCPC4S4 – 3
2	LBCPC4S4 – 3 * LBCPC5F17 – 3 – 5 – 1
3	LBSMPSMC5S4 – 1 – 1 * LBCPC4S4 – 1
4	255 – 18 – 19 – 60 – A – A * LBSMPSMC5S2 – 1
5	232 – 10 – 11 – 1 – A – A * LBSMPSMC5S4 – 1 – 2

Ambientes de evaluación

La evaluación de las cruza dobles y triples se realizó en las localidades de Juventino Rosas y Pénjamo, Gto. durante el ciclo P – V'2001. Los híbridos simples también fueron evaluados en dichas entidades, sin embargo, parte de estas fueron establecidas en el ciclo P-V' 99 y el resto en el 2001.

Las prácticas culturales fueron realizadas de acuerdo al paquete tecnológico perteneciente a cada localidad.

Metodología

Predicción de rendimiento

La predicción de rendimiento se llevó a cabo mediante dos metodologías, y sus resultados fueron validados a través de sus respectivas correlaciones con respecto al valor observado en las evaluaciones de las cruzas.

Predicción para híbridos simples

Método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR₂) (Griffing, 1956).

$$CS_{ij} = G_i + G_j$$

Donde: CS_{ij} = Comportamiento predicho de la craza simple expresado como una desviación con respecto a la media; G_i = Promedios en combinaciones híbridas de la línea L_i expresadas como desviaciones con respecto a la media ; G_j = Promedios en combinaciones híbridas de la línea L_j expresadas como desviaciones con respecto a la media .

Predicción para híbridos triples

Método B de Jenkins (PR₁) (Jenkins, 1934)

$$CT_{ijk} = \frac{F_{1ik} + F_{1jk}}{2}$$

Donde: CT_{ijk} = Comportamiento predicho de la craza triple; F_{1ik} = Valor cuantitativo de la craza simple CS_{ik} ; F_{1jk} = Valor cuantitativo de la craza simple CS_{jk} .

Método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR₂) (Griffing, 1956).

$$CT_{ijk} = G_{ij} + G_k$$

Donde: CT_{ijk} = Comportamiento predicho de la craza triple expresado como una desviación con respecto a la media; G_{ij} = Promedios en combinaciones híbridas de la craza simple CS_{ij} expresadas como desviaciones con respecto a la media, G_k = Promedios en combinaciones híbridas de la línea L_k expresadas como desviaciones con respecto a la media.

Predicción para híbridos dobles

Método B de Jenkins (PR₁) (Jenkins, 1934)

$$CD_{ijkl} = \frac{F_{1ik} + F_{1il} + F_{1jk} + F_{1jl}}{4}$$

Donde: CD_{ijkl} = Comportamiento predicho de la craza doble; F_{1ik} = Valor cuantitativo de la craza simple CS_{ik} ; F_{1il} = Valor cuantitativo de la craza simple CS_{il} ; F_{1jk} = Valor cuantitativo de la craza simple CS_{jk} ; F_{1jl} = Valor cuantitativo de la craza simple CS_{jl} .

Método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR₂) (Griffing, 1956).

$$CD_{ijkl} = G_{ij} + G_{kl}$$

Donde: CD_{ijkl} = Comportamiento predicho de la craza doble expresado como una desviación con respecto de la media; G_{ij} = Promedio en combinaciones híbridas de la craza simple CS_{ij} expresada como desviaciones con respecto a la media; G_{kl} = Promedio en combinaciones híbridas de la craza simple CS_{kl} expresadas como desviaciones con respecto a la media.

Criterios de validación

Para determinar el método más eficiente en la predicción de rendimiento de las cruzas simples, dobles y triples se realizaron las correlaciones entre los valores obtenidos en cada uno de los métodos bajo estudio y los valores observados en los ambientes de evaluación.

Estimación de heterosis

Fue determinada la heterosis de las cruzas dobles a través de la diferencia porcentual entre el valor de la progenie F_1 y el promedio de sus progenitores. Cabe señalar que la heterosis para cruzas simples y triples no fue obtenida, debido a que no se cuenta con la evaluación *per se* de las líneas

$$H_1 = \frac{F_1 - \left(\frac{P_1 + P_2}{2} \right)}{\left(\frac{P_1 + P_2}{2} \right)}$$

Donde: H_1 = Heterosis, F_1 = Valor cuantitativo de la progenie F_1 (híbrido simple, doble o triple); P_1 = Valor del primer progenitor (P_1); P_2 = Valor del segundo progenitor (P_2).

Variables evaluadas

Fenológicas

Días a floración femenina. Se tomaron los días transcurridos desde el riego de siembra hasta la fecha cuando un mínimo del 50 por ciento de planta por surco mostraron estigmas receptivos.

Días a floración masculina. Se registraron los días transcurridos desde el primer riego hasta que se alcanzó un mínimo del 50 por ciento de plantas por surco emitiendo polen.

Agronómicas

Altura de planta. Se midió la altura en centímetros desde la base de una planta representativa en el surco hasta el nudo donde empieza la espiga.

Altura de la mazorca. Se midió la altura en centímetros desde la base de una planta representativa en el surco hasta el nudo donde se inserta la mazorca.

Acame de raíz. Se registró el número de plantas con inclinación de 30° o más a partir de la perpendicular en la base de la planta, donde comienza la zona radicular,

posteriormente se determinó su porcentaje con respecto al número total de plantas por parcela.

Acame de tallo. Se registró el número de plantas con tallos rotos debajo de la mazorca y se determinó su porcentaje con respecto al número total de plantas por parcela.

Cobertura. Antes de cosechar, se contó el número de plantas que presentaron la mazorca expuesta, para posteriormente convertirse en porcentaje.

Aspecto de la mazorca. Se determinó después de la cosecha, antes tomar la muestra para la determinación de humedad, se extendió una pila con mazorcas cosechadas frente a cada parcela y se calificaron características tales como daños por enfermedades e insectos, tamaño de la mazorca, llenado de grano y uniformidad de las mazorcas según la escala de 1 a 5 (CIMMYT, 1995) donde:

1. Óptimo
2. Bueno
3. Regular
4. Deficiente
5. Muy deficiente

Fitosanitarias

Plantas con Fusarium. Se contó el número de plantas por parcela que presentaron daño por *Fusarium spp.*

Componentes del rendimiento.

Número de plantas cosechadas. Se contabilizaron las plantas cosechadas en cada surco.

Peso de campo. Después de cosechar las plantas por surco, se registró en kilogramos el peso de campo de las mazorcas.

Porcentaje de humedad. Se obtuvo una muestra de 100 g de grano por cada surco, posteriormente se determinó la humedad en un determinador Dickey Johns obteniendo con esto la humedad al momento de la cosecha.

Rendimiento de grano. Se obtuvo aplicando la siguiente formula:

$$\text{Rend} = [PC * (1 - \text{hum}/100) * (100/85) * (10000/APU)] * (1/1000) * ID$$

Donde: Rend = rendimiento de grano en toneladas por hectárea, ajustado al 15 por ciento de humedad; PC = Peso de campo en kilogramos; Hum = porcentaje de humedad al momento de la cosecha; APU = Área de parcela útil obtenida al multiplicar la distancia entre surcos, distancia entre plantas y el número de plantas por surco; ID = Índice de desgrane. En este trabajo se utilizó un índice de 0.8.

Ajuste por covarianza

Debido a que no todas las parcelas tenían el mismo número de plantas se realizó un análisis de covarianza. Una vez constatado el efecto significativo del coeficiente de regresión (b_1) se corrigió el rendimiento mediante la siguiente formula.

$$\hat{Y}_{ij} = Y_{ij} - b_i(x - \bar{x})$$

Donde: \hat{Y}_{ij} = Rendimiento corregido por covarianza; Y_i = Rendimiento observado en cada parcela; b_i = Coeficiente de regresión obtenido del análisis de covarianza; x = Número de plantas cosechadas en cada parcela; \bar{x} = Promedio de plantas cosechadas en el experimento.

Diseño experimental

Cada uno de los materiales evaluados fueron sembrados en un surco de 5 m de largo, a dos semillas por golpe y una distancia entre surcos de 0.75 m.

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con dos repeticiones por localidad y se analizó de manera individual y combinada bajo la metodología de modelos mixtos (Stroup, 1989) utilizando el paquete estadístico SAS (SAS, 1996), donde los efectos de repeticiones/ localidades y error fueron considerados como aleatorios y el resto como efectos fijos. Por lo que se obtuvo el mejor estimador lineal insesgado de los efectos de τ (tratamientos), en base al siguiente modelo lineal general:

$$Y = X\beta + Zu + e$$

Donde: Y = Es el vector de observaciones; β = Es el vector desconocido de los efectos fijos correspondiente a la matriz X ; u = Es el vector desconocido de los efectos aleatorios con base en la matriz de diseño Z ; e = Es el vector de residuales cuyos elementos no necesariamente tienen que ser independientes. La metodología de los modelos mixtos fue utilizada con base en el origen y desarrollo de material genético y el diseño experimental en la evaluación. El material genético de la presente investigación constó de cruza simples, triples y dobles, sin embargo en el caso de las cruza simples se utilizaron cruza evaluadas en el ciclo PV'99 y 2001. Con respecto al diseño

experimental, se utilizó bloques completos al azar para cuantificar la variación por localidad y a través de localidades.

Modelo Lineal

$$Y_{ijk} = \mu + \iota_i + \beta_{j(i)} + \tau_k + \iota\tau_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} = Valor observado en la i – ésima localidad, el j – ésimo bloque y el k – ésimo tratamiento; μ = Efecto de la media general; ι_i = Efecto de la i – ésima localidad; $\beta_{j(i)}$ = Efecto del j – ésimo bloque dentro de la i – ésima localidad; τ_k = Efecto del k – ésimo tratamiento; $\iota\tau_{ik}$ = Efecto de la interacción de la i – ésima localidad y el k – ésimo tratamiento y ε_{ijk} = Efecto del error experimental.

Con $\beta_{j(i)} \sim N(0, \sigma^2_{\beta(j(i))})$; $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2_{\varepsilon})$. Con la finalidad de estimar las diferencias de los efectos se utilizó un modelo mixto considerando fijas las localidades, tratamientos y tratamientos x localidades.

Cuadro 3.4. Estructura del análisis de varianza combinado para un diseño de Bloques Completos al Azar.

Fuente de variación	g.l	CM	ECM
Localidades	$l - 1$		
Bloques / localidades	$l(r - 1)$		
Tratamientos	$t - 1$	M3	$\sigma^2_E + r\sigma^2_h + rl\sigma^2_T$
Tratamientos * localidades	$(l - 1)(t - 1)$	M2	$\sigma^2_E + r\sigma^2_h$
Error	$l(tr - t - r + 1)$	M1	σ^2_E
Total	$lrt - 1$		

Diseño genético

Para el análisis genético de las cruzas triples fue utilizado el Diseño Carolina del Norte II (DCNII), cuyo modelo es el siguiente:

Modelo Lineal

$$Y_{ijkl} = \mu + l_i + B_{j(i)} + M_k + lM_{ik} + H_l + lH_{il} + MH_{kl} + lMH_{ikl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde: Y_{ijkl} = Valor observado en la i - ésima localidad, el j - ésimo bloque, con el k - ésimo macho y la l - ésima hembra como progenitores; μ = Media general; l_i = Efecto de la i - ésima localidad; $B_{j(i)}$ = Efecto del j - ésimo bloque dentro de la i - ésima localidad; M_k = Efecto del k - ésimo macho; lM_{ik} = Efecto de la interacción entre la i - ésima localidad y el k - ésimo macho; H_l = Efecto de la l - ésima hembra; lH_{il} = Efecto de la interacción entre la i - ésima localidad y la l - ésima hembra; MH_{kl} = Efecto de la interacción entre el k - ésimo macho y la l - ésima hembra; lMH_{ikl} = Efecto de la interacción entre la i - ésima localidad, k - ésimo macho y la l - ésima hembra; ε_{ijkl} = Efecto del error experimental.

Cuadro 3.5. Estructura del análisis varianza combinado para el Diseño II de Carolina del Norte (DCNII).

Fuentes de variación	g.l	CM	ECM
Localidades	$l - 1$		
Bloques / Localidades	$l(r - 1)$		
Tratamientos	$t - 1$		$\sigma^2_e + r\sigma^2_{lt} + rl\sigma^2_t$
Machos (ACG m)	$m - 1$	M7	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{lmh} + lr\sigma^2_{mh} + rh\sigma^2_{lm} + lrh\sigma^2_m$
Hembras (ACG h)	$h - 1$	M6	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{lmh} + lr\sigma^2_{mh} + rm\sigma^2_{lh} + lrm\sigma^2_h$
Machos * Hembras (ACE)	$(m - 1)(h - 1)$	M5	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{lmh} + lr\sigma^2_{mh}$
Tratamientos * Localidades	$(t - 1)(l - 1)$		$\sigma^2_e + r\sigma^2_{lt}$
Machos * Localidades	$(m - 1)(l - 1)$	M4	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{lmh} + rh\sigma^2_{lm}$
Hembras * Localidades	$(h - 1)(l - 1)$	M3	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{lmh} + rm\sigma^2_{lh}$
Machos * Hembras * Localidades	$(m - 1)(h - 1)(l - 1)$	M2	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{lmh}$
Error	Por diferencia	M1	σ^2_e
Total	$lrmh - 1$		

En el caso de las cruzas simples y dobles fue utilizado un análisis dialéctico bajo el método IV de Griffing cuyo modelo combinado a través de localidades se menciona a continuación.

Modelo Lineal

$$Y_{ijkl} = \mu + l_i + \beta_{j(i)} + g_k + g_l + s_{kl} + lg_{ik} + lg_{il} + ls_{ikl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde: Y_{ijkl} = Observación total; μ = Media general; l_i = Efecto de la i - ésima localidad; $\beta_{j(i)}$ = Efecto del j - ésimo bloque dentro de la i - ésima localidad; g_k = Efecto de la Aptitud combinatoria general del padre k ; g_l = Efecto de la aptitud combinatoria general del padre l ; s_{kl} = Efecto de aptitud combinatoria específica de los padres k y l ; lg_{ik} = Efecto de la interacción entre la i - ésima localidad y la aptitud combinatoria general del padre k ; lg_{il} = Efecto de la interacción entre la i - ésima localidad y la aptitud combinatoria general del padre l ; ls_{ikl} = Efecto de la interacción entre la i - ésima localidad y la aptitud combinatoria específica de los padres k y l ; ε_{ijk} = Efecto del error experimental.

Cuadro 3.6. Estructura del análisis de varianza combinado para el diseño IV de Griffing.

Fuentes de variación	g.l	CM	ECM
Localidades	$l - 1$		
Blk / localidades	$l(r - 1)$		
ACG	$p - 1$	M6	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{IACE} + r(p - 2)\sigma^2_{IACG} + rl\sigma^2_{ACE} + rl(p - 2)\sigma^2_{ACG}$
ACE	$[p(p - 3)] / 2$	M5	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{IACE} + rl\sigma^2_{ACE}$
ACG * Localidades	$(p - 1)(l - 1)$	M3	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{IACE} + r(p - 2)\sigma^2_{IACG}$
ACE * Localidades	$([p(p - 3)] / 2)(l - 1)$	M2	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{IACE}$
Error	$([p(p - 1) / 2] - 1)(r - 1)l$	M1	σ^2_e
Total	$[rp(p - 1) / 2] - 1$		

Estimación de Aptitud Combinatoria

Se realizó la estimación de los efectos de la Aptitud Combinatoria General (ACG) y Específica (ACE) tanto en las cruzas simples y dobles como en la triples con la finalidad de estimar el comportamiento genético de la cruzas y sus progenitores.

Efectos de ACG para el Diseño II de Carolina del Norte

$$g_{i(Lineas)} = \frac{X_{i..}}{tr} - \frac{X...}{ltr}$$

$$g_{j(cs)} = \frac{X_{.j.}}{lr} - \frac{X...}{ltr}$$

Efectos de ACE para el Diseño II de Carolina del Norte

$$s_{ij} = \frac{X_{ij.}}{r} - \frac{X_{i..}}{tr} - \frac{X_{.j.}}{lr} + \frac{X...}{ltr}$$

Donde: g_i y g_j = Efectos de ACG de los progenitores i (Línea) y j (CS) respectivamente; s_{ij} = Efecto de la ACE de los padres i y j ; $X_{i..}$ = Valor total de la i – ésima línea a través de todas sus cruzas; $X_{.j.}$ = Valor total de la j – ésima cruza simple; $X_{ij.}$ = Valor de la cruza entre la i – ésima línea y la j – ésima cruza simple;

$X_{..}$ = Valor total de la cruce entre todas las líneas y cruza simples; r = Número de repeticiones; l = Número de líneas; t = Número de cruza simples.

Efectos de ACG para el diseño IV de Griffing

$$\hat{g}_i = \frac{N-1}{N-2} (\bar{Z}_{i.} - \bar{Z})$$

Donde: \hat{g}_i = Efecto de ACG del progenitor i ; $\bar{Z}_{i.}$ = Media del progenitor i ; \bar{Z} = Media general.

Efectos de ACE para el diseño IV de Griffing

$$\hat{S}_{ij} = \bar{Z}_{ij} - \hat{g}_i - \hat{g}_j - \bar{Z}$$

Donde: \hat{S}_{ij} = Efecto de ACE de la cruce entre los progenitores i y j ; \hat{g}_i = Efecto de la ACG del progenitor i ; \hat{g}_j = Efecto de la ACG del progenitor j ; \bar{Z}_{ij} = Rendimiento del híbrido $i \times j$; \bar{Z} = Media general.

Para determinar la prueba de hipótesis de los efectos de aptitud combinatoria general y específica en el Diseño Carolina del Norte II y en el análisis Dialéxico se utilizaron las siguientes formulas:

$$t_{calculada} = \frac{\hat{e}}{ES(\hat{e})}$$

Donde: \hat{e} = Efecto estimado (ACG ó ACE); $ES(\hat{e})$ = Error estándar de e (ACG ó ACE).

Estimación del error estándar para el diseño Carolina del Norte II

$$ES(ACG_{linea}) = \sqrt{\frac{1}{rlh} CM(linea * loc)} \quad t_{tablas}(gl_{mxl}, \alpha)$$

$$ES(ACG_{CS}) = \sqrt{\frac{1}{rlm} CM(CS * loc)} \quad t_{tablas}(gl_{hxl}, \alpha)$$

$$ES(ACE) = \sqrt{\frac{1}{rl} CM(M * H * loc)} \quad t_{tablas}(gl_{mxxl}, \alpha)$$

Estimación del error estándar para el diseño Dialélico

$$ES(ACG) = \sqrt{\frac{p-1}{p(p-2)} \frac{CM(ACG \times loc)}{rl}} \quad t_{tablas}(gl_{ACGxl}, \alpha)$$

$$ES(ACE) = \sqrt{\frac{p-3}{p-1} \frac{CM(ACE \times loc)}{rl}} \quad t_{tablas}(gl_{ACE \times l}, \alpha)$$

Estimación de Parámetros Genéticos

Se calcularon los parámetros genéticos en base a el diseño IV de Griffing en cruza simples, considerando el coeficiente de endogamia $F = 1$ y de acuerdo a las formulas descritas por Hallauer y Miranda (1981).

* Cruzas Simples ($F = 1$)

$$\text{Varianza aditiva: } \sigma^2_A = 2\sigma^2_{ACG}$$

$$\text{Varianza de dominancia: } \sigma^2_D = \sigma^2_{ACE}$$

$$\text{Heredabilidad: } h^2 = \frac{\sigma^2_A}{\left(\frac{CM_{cruzas}}{rl} \right)}$$

Estimación de Varianzas y Errores Estándar

Para obtener los estimados a través de localidades se utilizaron los cuadrados medios que se presentan en el Cuadro 3.5 y 3.6 para el Diseño II de Carolina del Norte y el diseño IV de Griffing respectivamente.

Varianza de la varianza de ACG:

$$V(\sigma^2_{ACG}) = \frac{2}{[lr(p-2)]^2} \left[\frac{M_6^2}{g1M_6 + 2} + \frac{M_5^2}{g1M_5 + 2} + \frac{M_3^2}{g1M_3 + 2} + \frac{M_2^2}{g1M_2 + 2} \right]$$

Varianza de la varianza de ACE:

$$V(\sigma^2_{ACE}) = \frac{2}{(lr)^2} \left[\frac{M_5^2}{g1M_5 + 2} + \frac{M_2^2}{g1M_2 + 2} \right]$$

Varianza de la varianza aditiva: $V(\sigma^2_A) = 4V(\sigma^2_{ACG})$

Varianza de la varianza de dominancia: $V(\sigma^2_D) = 4V(\sigma^2_{ACE})$

Error estándar para la varianza de ACG: $\sqrt{V(\sigma^2_{ACG})}$

Error estándar para la varianza de ACE: $\sqrt{V(\sigma^2_{ACE})}$

Error estándar para la varianza aditiva: $\sqrt{V(\sigma^2_A)}$ ó $2\sqrt{V(\sigma^2_{ACG})}$

Error estándar para la varianza de dominancia: $\sqrt{V(\sigma^2_D)}$ ó $\sqrt{V(\sigma^2_{ACE})}$

Error estándar para la heredabilidad: $EE\sigma^2_A / \sigma^2_F$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Predicción de híbridos de cruce simple

La predicción de híbridos de cruce simple fue realizada en 78 cruces con base a la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores. Estos valores fueron correlacionados con sus respectivos valores observados. Se encontró una correlación significativa ($p \leq 0.01$) de probabilidad con un valor de $r = 0.534^{**}$, el cual a pesar de ser bajo, indica una alta relación entre los valores calculados y los observados.

Predicción de híbridos de cruce triple

El Cuadro 4.1 presenta los coeficientes de correlación entre el valor observado de las cruces triples y el valor de predicción con base al método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores y el método B de Jenkins.

Se encontró una correlación significativa ($p \leq 0.05$) de $r = 0.528$ entre el valor observado y el predicho bajo el método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores, en tanto que para el método B de Jenkins no se encontró una

relación lineal ($r = 0.263$). El método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores tiene una correlación significativa ($p \leq 0.01$) de $r = 0.731$ con respecto al método B de Jenkins.

Datos similares fueron reportados por Quemé (1989), quien al realizar la comparación entre la predicción bajo el método B de Jenkins y los valores observados para rendimiento encontró coeficientes de correlación no significativos entre 0.00 y 0.79, lo que sugiere que el método B de Jenkins no es el indicado para la predicción de híbridos triples.

Salmeron (1984) obtuvo correlaciones no significativas con valores de $r = -0.05$ y 0.12 entre lo predicho con el método B de Jenkins y lo observado en las localidades de Ursulo Galván, Veracruz y Río Bravo Tamaulipas respectivamente, solamente en la localidad de Iguala, Guerrero la correlación fue significativa ($p \leq 0.01$) ($r = 0.29$), por lo que en general concluyó que no existe concordancia entre lo predicho bajo este método y el observado, esto debido probablemente a la interacción Genotipo – Ambiente, aunque se observó que las características evaluadas tenían alta heredabilidad en todos los ambientes.

Cuadro 4.1. Correlación entre el valor observado y el predicho bajo los métodos B de Jenkins (PR_1) y el calculado a través de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2) en cruza triples.

	Predicción por PR_1	Valor Observado
Predicción por PR_2	0.731 **	0.528 *
Predicción por PR_1		0.263

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

Predicción de híbridos de cruza doble

La correlación entre los valores de predicción del método B de Jenkins (PR_1) y los valores observados fue de $r = 0.097$, la cual es casi nula y por lo tanto no significativa, sin embargo, para el método de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2) obtuvo una correlación altamente significativa ($p \leq 0.05$) con un valor de $r = 0.83$ (Cuadro 4.2).

Quemé (1989) realizó correlaciones para rendimiento entre lo predicho con el método B de Jenkins y los valores reales observados de cruza dobles resultando valores no significativos desde 0.39 hasta 0.60, lo que constata la baja relación existente entre estos y por lo tanto una eficiencia relativa de baja magnitud para la predicción de híbridos dobles.

En una serie de cruzas triples Tijerina (1995) observó que los mejores híbridos predichos bajo el método B de Jenkins al ser evaluados presentaban rendimientos bajos, sin embargo, cuando estas se predijeron mediante el promedio de sus prepotencias estos al ser evaluados ocupaban los primeros lugares en cuanto a rendimiento, por lo que concluyó que existe sesgo al predecir el comportamiento de los híbridos dobles mediante el método B de Jenkins.

Salmeron (1984) realizó en cruzas dobles la correlación entre lo predicho bajo el método B de Jenkins y los valores reales observados en las localidades de Iguala Guerrero, Río Bravo Tamaulipas y Ursulo Galván Veracruz obteniendo valores no significativos en las dos primeras ($r = 0.01$ y 0.19 respectivamente) y significativas en la última ($r = 0.26$), sin embargo, se llegó a la conclusión que la falta de concordancia entre estos valores probablemente se debía al efecto de la interacción Genotipo – Ambiente.

Cuadro 4.2. Correlación entre el valor real observado y el predicho bajo los métodos B de Jenkins (PR_1) y el calculado a través de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2) en cruzas dobles.

	Predicción por PR_1	Valor Observado
Predicción por PR_2	0.326	0.830 *
Predicción por PR_1		0.097

* Significativo al nivel 0.05 de probabilidad.

Estimación de parámetros genéticos

Análisis del diseño IV de Griffing para cruzas simples

El Cuadro 4.3 presenta los cuadrados medios para rendimiento en las cruzas simples en donde se observa la existencia de diferencias no significativas entre las localidades en donde fueron evaluados los ensayos así como entre las repeticiones por localidad, lo cual indica una homogeneidad del terreno y por lo tanto no existe diferencia entre estas o bien se debió aplicar otro diseño que permitiera identificar en mayor grado las diferencias.

Los efectos de ACG y ACE mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para rendimiento lo que refleja diferencias entre el comportamiento de las líneas, y permite identificar aquellas que presentan los mayores efectos de ACG así como las mejores combinaciones entre estas.

Los efectos de ACG x Localidad y ACE x Localidad presentan diferencias significativas ($P \leq 0.01$) por lo que dichos efectos interactúan con el ambiente y se comportan diferente en cada localidad de evaluación.

En cuanto a los parámetros genéticos se observó que para rendimiento la σ^2_A obtuvo un valor menor que la σ^2_D (1.048 y 4.775 respectivamente), lo cual también se puede confirmar al observar los valores de σ^2_{ACG} y σ^2_{ACE} , e indica que en la población enana se puede aplicar un método de mejoramiento que explote los efectos no aditivos para aumentar el rendimiento. Debido a que el rendimiento es un carácter con alta interacción genotipo – ambiente, este presentó baja heredabilidad con un valor de 0.157.

Cuadro 4.3. Cuadros medios del análisis de varianza bajo el diseño IV de Griffing para las cruzas simples.

Fuentes de variación	g.l	Rendimiento t ha ⁻¹
Localidades (Loc)	1	34.966
Repeticiones/ Loc	2	2.199
Cruzas	77	26.677 **
ACG	12	49.569 **
ACE	65	23.636 **
Cruzas x Loc	77	4.984 **
ACG x Loc	12	7.414 **
ACE x Loc	65	4.536 **
Error	154	1.192
Media		11.052
C.V		9.880
σ^2_{ACG}		0.524
σ^2_{ACE}		4.775
σ^2_A		1.048
σ^2_D		4.775
h^2		0.157
$EE\sigma^2_{ACG}$		0.441
$EE\sigma^2_{ACE}$		1.039
$EE\sigma^2_A$		0.882
$EE\sigma^2_D$		1.039
EEh^2		0.132

** Significativo al nivel 0.01 de probabilidad; σ^2_{ACG} , varianza de aptitud combinatoria general; σ^2_{ACE} , varianza de aptitud combinatoria específica; σ^2_A , varianza aditiva; σ^2_D , varianza de dominancia; $EE\sigma^2_{ACG}$, error estándar de la varianza de ACG; $EE\sigma^2_{ACE}$, error estándar de la varianza de ACE; $EE\sigma^2_A$, error estándar de la varianza aditiva; $EE\sigma^2_D$, error estándar de la varianza de dominancia.

Análisis del Diseño II de Carolina del Norte para cruzas triples

El Cuadro 4.4 muestra los cuadrados medios del análisis de varianza para las cruzas triples, en donde se puede observar diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre localidades para las variables rendimiento, días a floración masculina y femenina, no siendo así para la altura de planta y mazorca.

De igual forma, existe diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en las repeticiones en cada localidad para las variables días a floración masculina y femenina y significativa ($P \leq 0.05$) en altura de planta, lo que indica que el diseño utilizado permitió detectar las diferencias entre repeticiones para estas variables, sin embargo, no fue el caso para altura de mazorca y rendimiento, ya que en estos no se encontró significancia.

El efecto de aptitud combinatoria general para machos y hembras fue significativo ($P \leq 0.01$) en todas las variables, lo cual permite distinguir a los progenitores que presentan mayor ACG.

El efecto de ACE fue significativo ($P \leq 0.05$) para las variables días a floración femenina y altura de planta, y significativa ($P \leq 0.01$) para rendimiento, por lo que se pueden identificar cruzas sobresalientes en estos caracteres, no obstante, hubo diferencias no significativas para días a floración masculina y altura de mazorca por lo que estadísticamente sus efectos son iguales.

La interacción de los machos a través de localidades fue significativa ($P \leq 0.05$) y ($P \leq 0.01$) para las variables días a floración masculina y femenina respectivamente, lo cual indica que el ambiente afecta la expresión de estos caracteres, no siendo así para el resto de las variables.

En cuanto a la interacción de hembras a través de localidades, así como la interacción entre machos, hembras y localidades no hubo efectos significativos en las variables evaluadas ya que tanto las hembras como las cruza no tuvieron interacción con el ambiente, y por lo tanto su expresión no fue afectada por estas

Así mismo, se presentan las σ^2_M , σ^2_H y σ^2_{MXH} de las variables analizadas, de donde destaca que para rendimiento la σ^2_M fue superior a σ^2_H (2.249 y 0.784 respectivamente) por lo que se puede identificar más rápidamente la líneas (machos) superiores. La σ^2_{MXH} obtuvo un valor de 2.197, lo que indica la existencia de por lo menos una cruza superior.

Cuadro 4.4. Cuadrados medios del análisis de varianza bajo el Diseño II de Carolina del Norte para las cruza triples.

Fuentes de variación	g.l	Días a flor masculina	Días a flor femenina	Altura de planta cm	Altura de mazorca cm	Rendimiento t ha ⁻¹
Localidades	1	2416.026*	2493.671 *	4761.000	1849.000	71.199 *
Rep / Loc	2	26.417**	37.700**	1296.000*	661.000	1.421
M (ACGm)	4	79.075**	105.690**	2278.125**	1019.125**	55.456 **
H (ACGh)	4	61.073**	72.743**	15188.12**	7167.875**	26.926 **
M x H (ACE)	16	7.268	9.927*	767.812*	283.500	11.555 **
Loc x M	4	13.195*	20.536**	297.875	633.375	1.696
Loc x H	4	3.384	8.988	526.625	622.125	2.464
Loc x M x H	16	4.182	3.717	369.750	203.375	2.769
Error	48	5.112	5.002	403.290	247.46	2.313
Media		84	86	179.500	87.100	10.663
C.V.		2.261	2.595	20.082	18.060	14.379
$\sigma^2_{M(ACG)}$		3.140	3.947	79.109	15.281	2.249
$\sigma^2_{H(ACG)}$		2.730	2.877	713.172	323.281	0.784
$\sigma^2_{MXH(ACE)}$		0.772	1.553	99.512	20.031	2.197
$EE\sigma^2_{ACG}$		2.318	3.113	67.827	35.123	1.614
$EE\sigma^2_{ACE}$		1.771	2.123	438.936	207.778	0.805
$EE\sigma^2_{MXH(ACE)}$		0.699	0.883	71.017	29.075	0.990

*, ** Significativo al nivel 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente; $\sigma^2_{(M)ACG}$, varianza de aptitud combinatoria general en machos; $\sigma^2_{(H)ACG}$, varianza de aptitud combinatoria general en hembras; $\sigma^2_{MXH(ACE)}$, varianza de aptitud combinatoria específica; $EE\sigma^2_{ACG}$, error estándar de la varianza de ACG; $EE\sigma^2_{ACE}$, error estándar de la varianza de ACE.

Análisis del diseño IV de Griffing para cruza dobles

El análisis de varianza para cruza dobles (Cuadro 4.5) presentó en las localidades diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para las variables días a floración masculina y femenina, así como significativa ($P \leq 0.05$) para rendimiento, altura de

planta y mazorca, lo que indica que existen diferencias entre las localidades de evaluación.

En cuanto a las repeticiones en cada localidad, las variables días a floración masculina y femenina mostraron diferencias significativas al nivel ($P \leq 0.01$) y ($P \leq 0.05$) respectivamente, sin embargo no existió dicha diferencia para las variables rendimiento, altura de planta y mazorca, por lo que hubiera sido recomendable utilizar un diseño experimental que nos permitiera determinar las diferencias entre repeticiones a través de cada localidad, o bien existió homogeneidad en el terreno.

Los efectos de ACG registraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en cada una de las variables evaluadas, lo que permite una identificación y selección de los materiales que muestren efectos de ACG altos.

Con respecto a los efectos de ACE se observaron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en las variables días a floración masculina, altura de planta y mazorca, por lo que se pueden diferenciar las cruza dobles sobresalientes para estas variables, no obstante, las variables días a floración masculina y rendimiento mostraron efectos no significativos para ACE, lo cual dificulta la selección de materiales sobresalientes en base a estas variables.

Los efectos de la ACG a través de localidades presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) y ($P \leq 0.01$) para los caracteres días a floración masculina y

femenina respectivamente, lo cual indica que dichos efectos interactúan con el ambiente de evaluación; por lo contrario las variables rendimiento, altura de la planta y mazorca obtuvieron efectos no significativos para la interacción, lo que demuestra su estabilidad a través de diferentes localidades.

Los efectos de ACE a través de localidades fueron estables ya que no presentaron diferencias significativas entre estas para todos los caracteres evaluados a excepción de la variable altura de mazorca, quien muestra diferencias significativas ($P \leq 0.05$) y por lo tanto refleja una interacción con el medio ambiente.

Cuadro 4.5. Cuadrados medios del análisis de varianza bajo el diseño IV de Griffing para las cruzas dobles.

Fuentes de variación	g.l	Días a flor masculina	Días a flor femenina	Altura de planta cm	Altura de mazorca cm	Rendimiento t ha ⁻¹
Localidades	1	2006.074**	2085.02 **	3126.860 *	3126.860 *	27.347*
Rep / Loc	2	20.432**	14.074 *	324.405	149.182	0.508
Cruzas	20	22.918**	27.543 **	3298.371 **	1579.732 **	15.543**
ACG	6	59.820**	70.216 **	8966.027 **	4115.253 **	40.277**
ACE	14	7.103	9.255 **	869.375 **	493.080 **	4.943
Cruzas x Loc	20	8.668*	7.558 *	357.344	326.235 *	2.995
ACG x Loc	6	12.429*	11.535 **	299.896	254.776	2.084
ACE x Loc	14	7.057	5.924	381.964	356.860 *	3.385
Error	40	3.637	2.924	221.592	114.650	2.349
Media		83.970	86.279	189.643	93.660	10.885
C.V		2.271	1.982	7.849	12.841	14.080
σ^2_{ACG}		2.367	2.768	408.936	186.213	1.832
σ^2_{ACE}		0.012	0.833	487.411	34.055	0.390
$EE\sigma^2_{ACG}$		1.154	1.789	224.903	32.786	1.014
$EE\sigma^2_{ACE}$		0.885	0.971	83..932	53.799	0.529

*, ** Significativo al nivel 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente; σ^2_{ACG} , varianza de aptitud combinatoria general; σ^2_{ACE} , varianza de aptitud combinatoria específica; $EE\sigma^2_{ACG}$, error estándar de la varianza de ACG; $EE\sigma^2_{ACE}$, error estándar de la varianza de ACE.

Determinación de heterosis de cruzas dobles

Los híbridos dobles procedentes del cruzamiento entre las cruzas simples CS 3 x CS 5, CS 2 x CS 3 y CS 2 x CS 5 fueron las que presentaron mayor heterosis positiva con valores de 0.312, 0.240 y 0.231 (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Media de rendimiento y estimación de heterosis en cruzas dobles

Cruza	Media	Heterosis
CS 1 x CS 2	9.774	-0.108
CS1 x CS 3	13.199	0.149
CS1 x CS 4	8.843	-0.371
CS1 x CS 5	8.108	-0.288
CS 1 x CS 6	12.492	-0.076
CS 1 x CS 7	9.238	-0.251
CS 2 x CS 3	11.817	0.240
CS 2 x CS 4	8.675	-0.283
CS 2 x CS 5	11.608	0.231
CS 2 x CS 6	11.805	0.021
CS 2 x CS 7	9.833	-0.053
CS 3 x CS4	14.063	0.115
CS 3 x CS 5	13.062	0.312
CS 3 x CS 6	14.034	0.161
CS 3 x CS 7	12.181	0.117
CS 4 x CS 5	10.195	-0.186
CS 4 x CS 6	11.129	-0.240
CS 4 x CS 7	8.995	-0.332
CS 5 x CS 6	10.790	-0.099
CS 5 x CS 7	7.073	-0.345
CS 6 x CS 7	11.691	-0.096

CS, Cruza simple.

Aptitud combinatoria

Aptitud combinatoria general en las líneas progenitoras de las cruzas simples

En el Cuadro 4.7 se muestra la aptitud combinatoria general de las 13 líneas progenitoras de las cruzas simples evaluadas, en donde las líneas L 2 y L 12 presentan efectos significativos ($P \leq 0.01$).

Cuadro 4.7. Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria general para los progenitores las cruzas simples.

Línea	Media	ACG	Lugar ocupado
L 1	9.593	- 1.621 **	13
L 2	12.736	1.807 **	2
L 3	11.027	- 0.056	6
L 4	10.637	- 0.481	4
L 5	10.469	- 0.665	10
L 6	10.058	- 1.113 *	12
L 7	11.004	- 0.081	7
L 8	10.267	- 0.885 *	11
L 9	10.970	- 0.119	8
L 10	11.161	0.090	5
L 11	11.346	0.291	4
L 12	12.954	2.045 **	1
L 13	11.803	0.790	3

*, ** Diferentes de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad; L, línea.

Aptitud combinatoria específica de cruzas simples

En cuanto a la aptitud combinatoria específica, las cruzas L 1 x L 3 y L 2 x L 10, L 2 x L 11, L 4 x L 7, L 4 x L 8, L 4 x L 9, L 4 x L 13, L 5 x L 10, L 6 x L 10, L 7 x L 11, L 7 x L 12 y L 9 x L 13 obtuvieron efectos significativos ($P \leq 0.01$) con medias desde 14.112 a 18.122 respectivamente y efectos significativos ($P \leq 0.05$) en las cruzas L 2 x L 8, L 4 x L 10 y L 6 x L 12 con rendimientos de 14.532, 13.013 y 14.135 t ha⁻¹ respectivamente. Los híbridos simples L 1 x L 12, L 2 x L 3, L 2 x L 5, L 2 x L 12, L 2 x L 13, L 3 x L 12, L 3 x L 13, L 4 x L 11, L 4 x L 12, L 6 x L 11, L 9 x L 12, L 10 x L 13, L 11 x L 12 y L 12 x L 13 no mostraron significancia, sin embargo, presentaron altos rendimientos que oscilaban entre 12.033 y 15.107 t ha⁻¹ (Cuadro 4.8).

Cuadro 4.8. Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria específica en las cruza simples evaluadas.

Cruzas Simples	Media	ACE	Lugar ocupado	Cruzas Simples	Media	ACE	Lugar ocupado
CS 1 x CS 2	11.085	-0.180	41	CS 4 x CS 11	12.321	1.432	17
CS 1 x CS 3	13.703	4.302**	2	CS 4 x CS 12	13.543	0.900	24
CS 1 x CS 4	9.857	0.881	25	CS 4 x CS 13	14.122	7.265**	78
CS 1 x CS 5	7.823	-0.969	54	CS 5 x CS 6	9.030	-0.270	44
CS 1 x CS 6	9.425	1.080	21	CS 5 x CS 7	9.311	-1.020	58
CS 1 x CS 7	8.520	-0.856	50	CS 5 x CS 8	10.078	0.549	28
CS 1 x CS 8	6.400	-2.172*	68	CS 5 x CS 9	10.320	0.025	38
CS 1 x CS 9	10.343	1.004	23	CS 5 x CS 10	13.916	3.411**	6
CS 1 x CS 10	8.495	-1.052	59	CS 5 x CS 11	10.746	0.041	37
CS 1 x CS 11	6.607	-3.142**	75	CS 5 x CS 12	11.824	-0.634	47
CS 1 x CS 12	12.340	0.837	26	CS 5 x CS 13	11.575	0.371	31
CS 1 x CS 13	10.515	0.266	32	CS 6 x CS 7	8.790	-1.093	60
CS 2 x CS 3	14.116	1.286	20	CS 6 x CS 8	9.004	-0.075	40
CS 2 x CS 4	7.018	-5.387**	76	CS 6 x CS 9	8.832	-1.014	57
CS 2 x CS 5	12.033	-0.188	42	CS 6 x CS 10	13.357	3.301**	7
CS 2 x CS 6	9.523	-2.249*	69	CS 6 x CS 11	12.109	1.852	15
CS 2 x CS 7	10.807	-1.998*	67	CS 6 x CS 12	14.135	2.123*	14
CS 2 x CS 8	14.532	2.531*	12	CS 6 x CS 13	10.861	0.104	36
CS 2 x CS 9	11.465	-1.302	63	CS 7 x CS 8	10.497	0.385	30
CS 2 x CS 10	18.122	5.145**	1	CS 7 x CS 9	9.151	-1.727	65
CS 2 x CS 11	15.999	2.821**	10	CS 7 x CS 10	7.978	-3.109**	74
CS 2 x CS 12	13.023	-1.909	66	CS 7 x CS 11	15.176	3.886**	4
CS 2 x CS 13	15.107	1.430	18	CS 7 x CS 12	17.192	4.149**	3
CS 3 x CS 4	9.555	-0.985	55	CS 7 x CS 13	11.994	0.206	33
CS 3 x CS 5	9.419	-0.937	51	CS 8 x CS 9	10.075	0.000	39
CS 3 x CS 6	7.309	-2.599	72	CS 8 x CS 10	4.518	-5.765**	77
CS 3 x CS 7	9.386	-1.555	64	CS 8 x CS 11	10.593	0.108	35
CS 3 x CS 8	11.174	1.037	22	CS 8 x CS 12	11.697	-0.541	46
CS 3 x CS 9	10.124	-0.779	49	CS 8 x CS 13	11.720	0.736	27
CS 3 x CS 10	11.261	0.148	34	CS 9 x CS 10	10.058	-0.992	56
CS 3 x CS 11	11.045	-0.268	43	CS 9 x CS 11	8.910	-2.340*	71
CS 3 x CS 12	12.123	-0.944	52	CS 9 x CS 12	13.534	0.528	29
CS 3 x CS 13	13.107	1.294	19	CS 9 x CS 13	14.650	2.899**	9
CS 4 x CS 5	9.553	-0.378	45	CS 10 x CS 11	9.125	-2.335*	70
CS 4 x CS 6	8.324	-1.160	62	CS 10 x CS 12	10.515	-2.699**	73
CS 4 x CS 7	13.252	2.735**	11	CS 10 x CS 13	13.581	1.621	16
CS 4 x CS 8	12.917	3.205**	8	CS 11 x CS 12	12.315	-1.100	61
CS 4 x CS 9	14.176	3.697**	5	CS 11 x CS 13	11.206	-0.954	53
CS 4 x CS 10	13.013	2.325*	13	CS 12 x CS 13	13.203	-0.711	48

*, ** Diferentes de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad; CS, cruza simple.

Aptitud combinatoria general de líneas y cruza simples progenitoras de híbridos triples

La línea L 2 y la cruza simple CS 3 presentaron efectos significativos ($P \leq 0.01$) para rendimiento con medias de 12.425 y 12.278 t ha⁻¹ respectivamente (Cuadro 4.9).

Para el resto de las variables evaluadas la línea L 2 presenta valores positivos en sus efectos a excepción de los días a floración masculina, sin embargo las líneas L 3 y L 4 presentaron efectos no significativo aunque positivos para rendimiento y tienden a mostrar efectos negativos para los días a floración masculina y femenina, así como la altura de planta y mazorca. La cruza simple CS 3 obtuvo efectos positivos en la altura de planta y mazorca, no obstante tener efectos negativos en los días a floración tanto masculina como femenina (Cuadro 4.10).

Cuadro 4.9. Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria general en las líneas y cruza simples progenitoras de híbridos triples.

	Media	ACG	Lugar ocupado
Línea			
L 1	10.488	-0.174	4
L 2	12.425	1.761**	1
L 3	11.393	0.730	2
L 4	11.043	0.380	3
L 5	7.965	-2.697**	5
Cruza simple			
CS 1	10.629	-0.033	3
CS 2	11.273	0.610	2
CS 3	12.278	1.614**	1
CS 4	9.576	-1.086*	4
CS 5	9.557	-1.106*	5

*, ** Diferentes de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad; L, línea; CS, cruza simple.

Cuadro 4.10. Estimación de la aptitud combinatoria general de las variables evaluadas en líneas y cruza simples progenitoras de los híbridos triples.

	Días a floración masculina	Días a floración femenina	Altura de planta cm	Altura de mazorca cm	Rendimiento t ha ⁻¹
Línea					
L 1	3.108 *	3.838 *	- 2.000	- 2.600	-0.174
L 2	- 0.152	0.038	17.500 *	10.900	1.761 **
L 3	- 1.802	-2.161	-11.750 *	- 7.850	0.730
L 4	- 0.952	-1.211	- 2.250	- 3.100	0.380
L 5	- 0.049	-0.530	- 1.500	2.650	-2.697 **
Cruza simple					
CS 1	2.161 **	2.048 *	- 5.750	- 1.600	-0.033
CS 2	-0.852	-1.161	11.500	3.400	0.610
CS 3	-1.152 *	-1.111	41.750 **	30.150 **	1.614 **
CS 4	-1.552 *	-1.911 *	- 24.500 **	-15.850 *	-1.086 *
CS 5	1.582 *	2.238 *	- 23.000 *	-16.100 *	-1.106 *

*, ** Diferentes de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad; L, línea; CS, cruza simple.

Aptitud combinatoria específica de cruza triples

En el Cuadro 4.11 se puede observar que la cruza del híbrido CS 4 y la línea L 1 muestran efectos significativos ($P \leq 0.01$) con una media de 12.469 t ha⁻¹ y valores significativos ($P \leq 0.05$) para los híbridos triples CS 5 x L 4 y CS 2 x L 5 con medias 11.904 y 10.795 t ha⁻¹ respectivamente. A pesar de no tener efectos significativos, las cruza CS 1 x L 1, CS 1 x L 2, CS 1 x L 3, CS 1 x L 4, CS 2 x L 2, CS 2 x L 3, CS 3 x L 1, CS 3 x L 2, CS 3 x L 3, CS 3 x L 4, CS 4 x L 2 y CS 5 x L 3 presentan rendimientos que oscilan entre 10.984 y 14.272 t ha⁻¹.

Cuadro 4.11. Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria específica en cruzas triples.

Cruzas Triples	Media	ACE	Lugar ocupado	Cruzas Triples	Media	ACE	Lugar ocupado
CS 1 x L 1	11.580	1.125	5	CS 3 x L 4	13.171	0.513	7
CS 1 x L 2	12.886	0.494	8	CS 3 x L 5	8.438	-1.141	20
CS 1 x L 3	10.984	-0.375	16	CS 4 x L 1	12.469	3.067 **	1
CS 1 x L 4	11.208	0.198	11	CS 4 x L 2	11.481	0.145	12
CS 1 x L 5	6.488	-1.443	23	CS 4 x L 3	8.263	-2.043 *	24
CS 2 x L 1	10.582	-0.517	18	CS 4 x L 4	8.687	-1.269	21
CS 2 x L 2	12.727	-0.307	15	CS 4 x L 5	6.981	0.102	13
CS 2 x L 3	12.017	0.013	14	CS 5 x L 1	6.112	-3.270 **	25
CS 2 x L 4	10.245	-1.408	22	CS 5 x L 2	10.756	-0.562	19
CS 2 x L 5	10.795	2.220 *	2	CS 5 x L 3	11.891	1.604	4
CS 3 x L 1	11.698	-0.405	17	CS 5 x L 4	11.904	1.966 *	3
CS 3 x L 2	14.272	0.232	10	CS 5 x L 5	7.121	0.665	9
CS 3 x L 3	13.808	0.800	6				

*, ** Diferentes de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad; L, línea; CS, cruz simple.

Efectos de aptitud combinatoria general de cruzas simples que forman las cruzas dobles

El Cuadro 4.12 muestra los efectos de aptitud combinatoria general para rendimiento en donde las cruzas simples CS 3 y CS 6 presentan los valores más altos y significativos (2.608 y 1.324 t ha⁻¹ respectivamente con $P \leq 0.01$).

Para el resto de las variables evaluadas, el efecto de la aptitud combinatoria general de la cruz CS 3 aumenta la altura de la planta y de mazorca, sin embargo disminuye los días a floración masculina y femenina. La cruz CS 6 fue la que presentó

los efectos más deseables ya que tiende a aumentar el rendimiento y disminuir los demás caracteres (Cuadro 4.13).

Cuadro 4.12. Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria general de las cruza simples progenitoras de híbridos dobles.

Cruza Simple	Media	ACG	Lugar ocupado
CS 1	10.275	-0.732 *	5
CS 2	10.585	-0.360	3
CS 3	13.059	2.608 **	1
CS 4	10.316	-0.683	4
CS 5	10.139	-0.895 *	6
CS 6	11.989	1.324 **	2
CS 7	9.834	-1.260 **	7

*, ** Diferentes de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, CS; cruza simple.

Cuadro 4.13. Estimación de la aptitud combinatoria general de las variables evaluadas en cruza simples progenitoras de híbridos dobles.

Cruza simple	Días a floración masculina	Días a floración femenina	Altura de planta cm	Altura de mazorca cm	Rendimiento t ha ⁻¹
CS 1	1.610	1.989 *	-14.696 **	-10.392 *	-0.732 *
CS 2	-1.164	-1.085	16.803 **	8.982 *	-0.360
CS 3	-0.789	-0.885	40.928 **	28.357 **	2.608 **
CS 4	-1.114	-1.335	-10.321	-2.892	-0.683
CS 5	3.235 **	3.314 **	-16.321 **	-7.142	-0.895 *
CS 6	-1.089	-1.435	-6.071	-4.017	1.324 **
CS 7	-0.689	-0.560	-10.321 *	-12.892 **	-1.260 **

*, ** Diferentes de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad; CS, cruza simple.

Aptitud combinatoria específica en cruzas dobles

La combinación entre las cruzas simples CS 2 y CS 5 presentó el único efecto significativo ($P \leq 0.01$) en la aptitud combinatoria específica para rendimiento con una media de 11.607 t ha⁻¹, no obstante que las cruzas CS 3 x CS 4, CS 3 x CS 6, CS 1 x CS 3, CS 3 x CS 5, CS 1 x CS 6, CS 3 x CS 7, CS 2 x CS 3, CS 6 x CS 7 y CS 2 x CS 6 no presentaron significancia en sus efectos, estas registraron rendimientos que oscilan entre 14.062 y 11.690 t ha⁻¹ (Cuadro 4.14) y tiene como progenitores ya sea la craza simple CS 3 ó CS 6, las cuales mostraron los mejores efectos de aptitud combinatoria general.

Cuadro 4.14. Media de rendimiento y estimación de la aptitud combinatoria específica en cruzas dobles.

Cruzas Dobles	Media	ACE	Lugar ocupado	Cruzas Dobles	Media	ACE	Lugar ocupado
CS 1 x CS 2	9.773	-0.018	11	CS 3 x CS 4	14.062	1.251	2
CS 1 x CS 3	13.199	0.437	8	CS 3 x CS 5	13.061	0.463	7
CS 1 x CS 4	8.842	-0.627	16	CS 3 x CS 6	14.033	-0.785	17
CS 1 x CS 5	8.108	-1.149	18	CS 3 x CS 7	12.180	-0.052	13
CS 1 x CS 6	12.491	1.013	3	CS 4 x CS 5	10.194	0.887	4
CS 1 x CS 7	9.237	0.345	9	CS 4 x CS 6	11.129	-0.398	14
CS 2 x CS 3	11.817	-1.315	20	CS 4 x CS 7	8.995	0.053	10
CS 2 x CS 4	8.674	-1.167	19	CS 5 x CS 6	10.789	-0.525	15
CS 2 x CS 5	11.607	1.978 **	1	CS 5 x CS 7	7.073	-1.655 *	21
CS 2 x CS 6	11.804	-0.045	12	CS 6 x CS 7	11.690	0.740	5
CS 2 x CS 7	9.832	0.568	6				

*, ** Diferentes de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad; CS, craza simple.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos de la correlación entre el valor observado en la evaluación *per se* de la crusa y el valor predicho bajo las dos metodologías, el método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores es el mejor predictor de cruza simples, dobles y triples a comparación del método B de Jenkins.

Las cruza dobles CS 3 x CS 5, CS 2 x CS 3 y CS 2 x CS 5 fueron las que presentaron mayor heterosis positiva con valores de 0.312, 0.240 y 0.231.

Las líneas L 2 y L 12 progenitoras de cruza simples mostraron efectos significativos ($P \leq 0.01$) para rendimiento. En cruza triples, las líneas L 3 y L 4, así como la crusa simple CS 3 obtuvieron efectos positivos para ACG en rendimiento, y presentaron atributos adecuados para el resto de las variables. Así mismo, la crusa simple CS 3 y CS 6 presentaron efectos significativos ($P \leq 0.01$) para rendimiento y además de mostrar características deseables para la mayoría de variables evaluadas.

Los híbridos con efectos significativos para ACE ($P \leq 0.01$) en la variable rendimiento fueron: En cruzas simples los híbridos L 1 x L 3, L 2 x L 10, L 2 x L 11, L 4 x L 7, L 4 x L 8, L 4 x L 9, L 4 x L 13, L 5 x L 10, L 6 x L 10, L 7 x L 11, L 7 x L 12 y L 9 x L 13, en cruzas triples, el híbrido entre la CS 4 y la línea 1 y en cruzas dobles, la combinación entre las cruzas simples CS 2 y CS 5.

En cuanto a los parámetros genéticos, para rendimiento se observó que la σ^2_A obtuvo un menor valor que la σ^2_D (1.048 y 4.775 respectivamente), lo que indica que se puede aplicar un método de mejoramiento que explote los efectos no aditivos de la población. Debido a que el rendimiento es un carácter con alta interacción genotipo – ambiente, este presentó baja heredabilidad con un valor de 0.157.

VI. RESUMEN

La predicción de híbridos es esencial dentro de un proceso de mejoramiento genético ya que nos permite determinar las mejores combinaciones de progenitores en reducido tiempo. El método B de Jenkins es el más utilizado hasta la fecha, sin embargo, este no presenta una buena correlación entre lo predicho y lo observado, por lo que, el objetivo principal de esta investigación fue comparar dos metodologías para la predicción de rendimiento.

Los métodos utilizados fueron: B de Jenkins (PR_1) y el basado en la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2), los cuales fueron correlacionados con el rendimiento observado al evaluar las cruzas.

El diseño estadístico utilizado fue Bloques Completos al Azar con dos repeticiones y una parcela experimental de un surco de 5 m de largo y 0.75 m de ancho, evaluados en las localidades de Juventino Rosas y Penjamo, Gto.

Se realizó un análisis individual y combinado a través de localidades utilizando la metodología de modelos mixtos y el Mejor Estimador Lineal Insesgado (MELI).

Así mismo, se hizo el análisis dialélico bajo el modelo IV de Griffing para cruzas simples, de donde se obtuvieron los estimadores de σ^2_A , σ^2_D , heredabilidad y sus respectivos errores estándar. En cruzas triples se desarrollo un análisis del Diseño II de Carolina de Norte y en cruzas dobles se realizó a través del diseño IV de Griffing, en ambos tipos de cruzas se estimaron la ACG, ACE y sus errores estándar.

Los resultados obtenidos en esta investigación indicaron que el método de la suma de los efectos de la aptitud combinatoria general de los progenitores es el mejor predictor de rendimiento para cruzas simples, triples y dobles ya que se obtuvieron correlaciones significativas ($P \leq 0.05$ ó $P \leq 0.01$) entre el valor predicho y el observado en la evaluación *per se* de las cruzas, lo cual no se cumplió para el método B de Jenkins, ya que no mostró correlaciones no significativas para los híbridos triples y dobles.

Se estimó la heterosis para rendimiento en cruzas dobles, en donde los híbridos CS 3 x CS 5, CS 2 x CS 3 y CS 2 x CS 5 fueron las que presentaron mayor heterosis positiva con valores de 0.312, 0.240 y 0.231 respectivamente.

Las estimaciones de los parámetro genéticos de la población indicaron que existía menor σ^2_A que σ^2_D (1.048 y 4.775 respectivamente) por lo que se debe aplicar un método de mejoramiento que explote los efectos no aditivos. Debido a que el rendimiento es un carácter con alta interacción genotipo – ambiente, este presentó baja heredabilidad con un valor de 0.157.

En relación a los efectos de aptitud combinatoria general de los progenitores de los híbridos evaluados, las líneas L 2 y L 12 progenitoras de cruzas simples mostraron efectos significativos ($P \leq 0.01$) para rendimiento. En cruzas triples, las líneas L 3 y L 4, así como la craza simple CS 3 obtuvieron efectos positivos para ACG en rendimiento, y presentaron atributos adecuados para el resto de las variables. Así mismo, en híbridos dobles la craza simple CS 3 y CS 6 presentaron efectos significativos ($P \leq 0.01$) para rendimiento y además de mostrar características deseables para la mayoría de variables evaluadas.

Los híbridos con efectos significativos ($P \leq 0.01$) para rendimiento en los tres tipos de craza fueron: en cruzas simples los híbridos L 1 x L 3, L 2 x L 10, L 2 x L 11, L 4 x L 7, L 4 x L 8, L 4 x L 9, L 4 x L 13, L 5 x L 10, L 6 x L 10, L 7 x L 11, L 7 x L 12 y L 9 x L 13, en cruzas triples, el híbrido entre la craza simple CS 4 y la línea L 1 y en cruzas dobles, la combinación entre las cruzas simples CS 2 y CS 5.

VI. LITERATURA CITADA

- Allard, R.W. 1980. Principios de la Mejora Genética de las Plantas. Traducción en español por J. L. Montoya. Ed. Omega. Barcelona, España 498p.
- Brauer H, O. 1969. Fitogenética Aplicada. Ed. Limusa – Wiley, S.A. México. 518p.
- Castro G., A. 1989. Evaluación de cruzas simples de maíz tropical, predicción de cruzas triples y dobles y parámetros de estabilidad. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 110p.
- CIMMYT. 1995. Manejo de ensayos e informe de los datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz del CIMMYT. México.
- Comstock, R. E. and H.F. Robinson. 1948. The components of genetic variance in populations of biparental progenies and their use in estimating the average degree of dominance. *Biometrics* 4: 254 – 266.
- Cubero J., I. 1999. Introducción a la Mejora Genética Vegetal. Ed. Mundi – Prensa. España. 365p.
- Fehr, W. R. 1983. Applied Plant Breeding. Second Edition. Iowa State University. U. S. A.
- Fuentes M., L. Larios, J.L. Quemé, C. Pérez y S. Castellanos. 1994. Evaluación regional de cruzas dialélicas y predicción de híbridos de maíz blanco. Síntesis de Resultados Experimentales del PRM 1993 – 95, 4: 47 - 52.
- Gutiérrez G., H. I. 1987. Predicción de híbridos tropicales de maíz a partir de la evaluación de cruzas simples en tres ambientes. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. México.
- Griffing, B.1956. Concept of General and Specific Combining Ability in Relation to Diallel Crossing Systems. División of Plant Industry, CSIRO, Canberra, A.C.T. *Austr. Jour. Biol. SC.* 9: 463 – 493.

- Hallauer, A. R. and J. B. Miranda. 1981. Quantitative Genetics in Maize Breeding. Iowa State University Press, U. S. A. 469p.
- Jenkins M. T. 1934. Method of estimating the performance of double crosses in corn. Journal of American Society of Agronomy 26: 199 – 204.
- Jugenheimer, R. W. 1990. Maíz Variedades Mejoradas. Métodos de Cultivo y Producción de Semillas. Versión española por R. Piña G. Ed. Limusa. México 834p.
- Larios L., S. Castellanos, J.L. Quemé y C. Pérez. 1992. Predicción de híbridos de maíz de grano blanco a partir de cruzas dialélicas en seis ambientes de Centro América. Síntesis de Resultados Experimentales del PRM 1992, 4: 47 - 52.
- López P., E. 1976. Cruzas dialélicas en maíz super enano y predicción de cruzas triples y dobles. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 46p.
- Lugo H., F. 1993. Selección y Estimación de Parámetros Genéticos en Híbridos y sus Cruzas Simples
- Progenitoras en Maíz. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. México 112p.
- Márquez S., F. 1988. Genotécnia Vegetal. Tomo II. . AGT. México, D.F. 665p.
- Preciado O., E, H. Córdova, A. Terrón, E. Cervantes, E. Betanzos, A. Ortega, N. Gómez, C. Reyes, H. Vallejo y M. Erazo. 2001. Adaptación y rendimiento de híbridos de alta calidad de proteína de regiones tropicales y subtropicales de maíz. Agronomía Mesoamericana. 12 (1) : 33 – 39.
- Quemé D., J.L 1989. Predicción y evaluación de cruzas dobles y de tres líneas de maíz (*Zea mays* L.) en la zona baja de Guatemala. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 113p.
- Reyes C., P. 1985. Fitogenética Básica y Aplicada. Ed. AGT. México. 460p.
- Robles S., R. 1987. Terminología Genética y Fitogenética. Ed. Trillas. México. 163p.
- Salmeron E., J. 1984. Rendimiento predicho y observado de las mejores cruzas triples y dobles de maíz (*Zea mays* L.) en el trópico húmedo. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo. Coah. México 63p.
- SAS. 1996. SAS/STAT user's guide: 6.11th ed. Vol. 2. SAS Inst. Cary, N. C. 956 p.

- Stroup, W.W. 1989. Predictable functions and prediction space in mixed model procedure. In: Applications of Mixed Models in Agricultural and Related Disciplines. Sothern Cooperative Series. Bulletin No. 343. Lousiana Agricultural Experiment Station. pp: 39 – 48.
- Tijerina C., J.L. 1995. Selección de híbridos dobles y estimación de aptitud combinatoria de cruza simples de maíz. Tesis de –maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista Saltillo, Coah. México. 405p.
- Villasana B., J.L. 1998. Identificación de nuevas líneas de maíz de porte normal y predicción de híbridos triples y dobles para el trópico seco y bajo mexicano. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 58p.