

**COMPORTAMIENTO DE CARACTERES AGRONÓMICOS Y  
EXPLORACIÓN DE VARIABLES DE CLASIFICACIÓN MEDIANTE  
DIFERENTES ESTRATEGIAS PARA EL MEJORAMIENTO DE MAÍZ**

**REYNA ROJAS GARCÍA**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA**

**OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**FITOMEJORAMIENTO**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA**

**ANTONIO NARRO**

**BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO**

**JUNIO DE 2013**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

COMPORTAMIENTO DE CARACTERES AGRONÓMICOS Y  
EXPLORACIÓN DE VARIABLES DE CLASIFICACIÓN MEDIANTE  
DIFERENTES ESTRATEGIAS PARA EL MEJORAMIENTO DE MAÍZ

TESIS POR

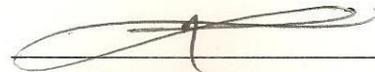
REYNA ROJAS GARCÍA

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

MAESTRO EN CIENCIAS  
FITOMEJORAMIENTO

Comité Particular

Asesor principal:



---

Dr. Humberto de León Castillo

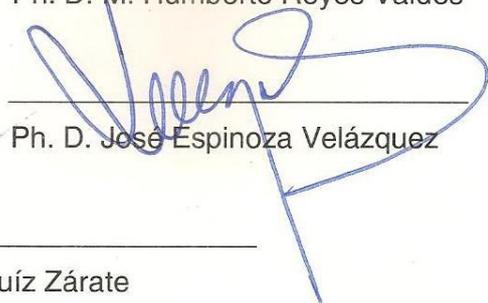
Asesor:



---

Ph. D. M. Humberto Reyes Valdés

Asesor:



---

Ph. D. José Espinoza Velázquez



---

Dr. Fernando Ruíz Zárate  
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio 2013

## **AGRADECIMIENTOS**

**Al Dr. Humberto de León Castillo por permitirme ser su asesora, por todo el tiempo que me ha dedicado y por no soltar mi mano en mis momentos de flaqueza.**

**Al Dr. M. Humberto Reyes Valdés por su amabilidad, disposición a ayudarme en todo el transcurso de la maestría y las sugerencias que me brindo en la realización de este trabajo.**

**Al Dr. José Espinoza Velázquez por toda su paciencia, gentileza, interés y sugerencias en la realización de esta investigación.**

**A mis compañeros de la maestría por siempre mostrar amistad, interés y preocupación por mi persona, por dedicarme su tiempo y ayuda de manera incondicional.**

## **DEDICATORIA**

**A Dios por mostrarme que siempre vendrá en mi auxilio si a él clamare  
y que todo será posible si en el depositare mi confianza.**

**A mi hermana y mi hermano por no solo ser hermanos sino mis  
amigos, y porque jamás han dudado en darme su apoyo.**

**A mis padres por ser ejemplo y guía en mi vida.**

## RESUMEN

Comportamiento de Caracteres Agronómicos y Exploración de Variables de Clasificación Mediante Diferentes Estrategias para el Mejoramiento de Maíz

POR

REYNA ROJAS GARCIA

MAESTRO EN CIENCIAS  
EN FITOMEJORAMIENTO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, JUNIO 2013

Dr. Humberto de León Castillo – Asesor –

**Palabras clave:** patrones de respuesta, índices de selección, correlación entre variables.

El Instituto Mexicano del Maíz anualmente realiza evaluaciones para discriminar líneas, elegir probadores e identificar híbridos, así como la exploración de estrategias que asistan al mejoramiento para obtener una mayor respuesta en la selección. En este estudio se evaluaron 282 cruzas de prueba en tres ambientes del sub-trópico con los siguientes objetivos: i)

Explorar la interacción de probadores con líneas, para ubicar a las líneas bajo estudio en grupos heteróticos; ii) visualizar tendencias naturales de agrupación entre variables agronómicas para construir un índice de selección; iii) selección de líneas auxiliado por un índice de selección construido con efectos de ACG, e híbridos con base en la estabilidad del valor de un índice de selección con valores fenotípicos; iv) selección de probadores como progenitores y para discriminación de líneas; y v) comparar el índice de selección de Elston con el índice de selección de Barreto. El procedimiento para identificar grupos heteróticos fue mediante el modelo AMMI línea por probador con base en efectos de ACE de rendimiento de grano, y para detectar agrupaciones de variables se utilizó el modelo AMMI híbrido por variable con valores fenotípicos; la construcción de índices de selección fue incluyendo las variables representativas detectadas por el modelo AMMI; para la selección de probadores como progenitores se tomó como criterio el promedio favorable por variable, mientras que para la capacidad discriminatoria del probador el valor del cuadrado medio y efectos de ACG; para comparar las metodologías de índices de selección se utilizó la correlación de Pearson. Los resultados muestran que la aplicación del modelo AMMI en la identificación de grupos heteróticos, permitió detectar dos grupos de probadores y dos probadores contrastantes P1 y P3; y el uso de este modelo en el estudio de variables asociadas hizo posible detectar tres grupos de variables correlacionadas donde se eligió una variable representativa por agrupación, del primer conjunto días a floración femenina, calificación

de

planta del segundo y rendimiento de grano del tercer grupo. El uso de índices de selección permitió la elección de doce líneas y su consecuente afiliación en base a valores de ACE dentro de los grupos heteróticos identificados. El uso del modelo SREG en la selección de híbridos permitió detectar dos mega-ambientes y a los híbridos más sobresalientes para cada uno de ellos, y la utilización del ambiente promedio virtual del modelo SREG permitió identificar a los híbridos H86, H215 y H266 como estables y con índice de selección favorable. La exploración del comportamiento de probadores detectó como progenitores potenciales a los probadores P2 y P6 y al probador P1 como el de mayor poder de discriminación. Los resultados de la comparación de los índices de selección, construidos con las variables representativas, mediante las metodologías de Barreto y Elston mostraron ordenamientos similares y una correlación de (0.95).

## SUMMARY

Behavior of Agronomic Characters and Exploration of Variable Classification  
through Different Strategies in Corn Breeding.

By

Reyna Rojas García

Master in Science in Plant Breeding

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, JUNIO 2013

Dr. Humberto de León Castillo –Advisor-

**Key words:** response patterns, selection indexes, variable correlation

The Mexican Corn Institute annually carries out evaluations to discriminate lines, select testers and identify hybrids, as well as the exploration of strategies that can help the breeding to get a better selection response. In this study 282 crosses were evaluated in three different subtropical environments with the following objectives: i) Explore the interaction of testers with lines to locate the lines under study in heterotic groups; ii)

visualize natural tendencies of grouping among the agronomic variables to build a selection index; iii) Line selection helped by a selection index built with effects of GCA and hybrids with basis on the value stability of a selection index with phenotypic values; iv) selection of testers as progenitors and line discrimination; and v) compare Elston's selection index with Barreto's one. The procedure to identify heterotic groups was through AMMI line by tester model with basis on effects of SCA on grain yield, and to detect the variable grouping the AMMI hybrid by variable model was used with phenotypic values; the construction of the selection indexes was including the representative variables detected by the AMMI model. For the selection of the testers as progenitors the criteria of the favorable average per variable was taken in contrast for its discriminatory capability the value of the mean square and GCA effects for testers and to compare the methodologies of selection indexes, Pearson's correlation was used. The results showed that the use of the AMMI model to identify the heterotic groups allowed the detection of two groups of testers and two contrasting testers P1 and P3; and the use of this model in the study of associated variables made possible to detect three groups of variables where a representative variable was chosen for each group: days to female blooming for the first group, plant rating for the second and yield for the third one. The use of selection indexes allowed the election of twelve lines and their consistent affiliation with basis on values of SCA among the identified heterotic groups. The use of the SREG model in the selection of hybrids allowed us to detect two mega-environments and the best hybrids for each one and the use of the average virtual environment of the SREG model allowed us to identify the H86, H125 and H266 hybrids as

stables and with a favorable selection index. The exploration of the testers behavior detected as potential progenitors the P2 and P6 testers and the P1 tester was the one that has the major discrimination power. The results of the selection indexes comparison built with the representative variables, using Barreto and Elston's methodologies showed similar arrangements and a correlation of (0.95)

## Contenido

I. INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivos.....	4
Hipótesis.....	5
II. REVISION DE LITERATURA.....	6
Línea por probador .....	6
Aptitud combinatoria .....	8
Grupos heteróticos .....	10
Índices de selección .....	12
Biplots (AMMI y SREG) .....	15
III. MATERIALES Y METODOS.....	18
Materiales .....	18
Descripción de los ambientes de evaluación.....	20
Descripción de la parcela experimental .....	21
Labores culturales .....	21
Variables evaluadas .....	23
Fenológicas .....	23
Agronómicas .....	23
Fitosanitarias .....	24
Componentes de rendimiento .....	24
Diseño experimental y análisis de datos.....	25
Análisis de varianza general.....	25
Línea por probador .....	26
Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) y su gráfico Biplot.....	28
Exploración de la interacción de probadores con atención a los efectos de ACE .....	28
Detección de agrupamientos entre variables .....	29
Índice de selección de Barreto et al (1991) .....	30

Selección de líneas .....	32
Afiliación de líneas dentro de grupos heteróticos .....	32
Selección de híbridos .....	33
Selección de probadores .....	34
Comparación entre el índice de Elston y el Índice de Barreto, y de ambos índices con calificación de planta. ....	34
Criterios de selección. ....	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	37
Análisis de varianza general combinado .....	37
Patrones de respuesta de probadores con atención a efectos de ACE mediante el modelo AMMI .....	41
Detección de agrupamientos entre variables agronómicas correlacionadas mediante el modelo AMMI y su gráfico biplot .....	43
Estimación de Índices de selección para líneas. ....	45
Análisis de varianza de índices de selección de las líneas para probadores P1 y P4.....	46
Análisis de varianza de índices de selección de las líneas para probadores P2 y P3.....	48
Afiliación de líneas.....	49
Estimación de índices de selección para híbridos. ....	51
Selección de híbridos mediante el modelo SREG .....	52
Exploración del comportamiento de probadores .....	55
Correlaciones entre el índice de selección de Barreto contra el índice de selección de Elston y de ambos índices con calificación de planta .....	58
V. CONCLUSIONES .....	60
VI. Literatura citada .....	62
VII. APENDICE .....	66

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
3.1	Genealogía de las líneas.....	19
3.2	Situación geográfica y características climáticas de los ambientes de evaluación: Silao Gto., Jaral del progreso Gto., y El Prado, Galeana Nuevo León. ....	21
4.1	Cuadrados medios del análisis de varianza combinado para diez variables en evaluadas en tres ambientes durante 2011.....	37
4.2	Cuadrados medios del análisis de varianza línea por probador para diez variables evaluadas en tres ambientes durante 2011.....	39
4.3	Análisis de varianza de los valores del índice de selección construido con valores de ACG para líneas cruzadas con los probadores P1 y P4.....	47
4.4	Medias de los valores del índice de selección para líneas cruzadas con los probadores P1 y P4.....	47
4.5	Análisis de varianza de los valores del índice de selección construido con valores de ACG para líneas cruzadas con los probadores P2 y P3.....	48
4.6	Medias del valor índice de selección para líneas cruzadas con los probadores P2 y P3.....	49
4.7	Valores de la media de ACE de líneas seleccionadas a través de los grupos de probadores P2, P3 y P1, P4....	51
4.8	Análisis de varianza de valores del índice de selección construido con valores fenotípicos para híbridos experimentales evaluados durante 2011.....	52

4.9	Medias de rendimiento de grano, valor de ACG y cuadrados medios por variable de los seis probadores empleados en la selección de líneas.....	56
4.10	Correlación entre el índice de Elston y el índice de Barreto; y de ambos índices entre sí mismos con ocho y tres variables.....	59
4.11	Correlación entre el índice de Elston y el Índice de Barreto con calificación de planta.....	59
A.1	Metas e intensidades utilizadas por repetición para el cálculo de índices de selección de los valores de ACG de líneas cruzadas con los probadores P1 y P4 para 3 variables fenotípicas.....	66
A.2	Metas e intensidades utilizadas por repetición para el cálculo de índices de selección de los valores de ACG de líneas cruzadas con los probadores P2 y P3 para 3 variables fenotípicas.....	66
A.3	Metas e intensidades utilizadas por repetición para el cálculo de índices de selección de híbridos para 3 variables fenotípicas.....	65
A.4	Valores del análisis de correlación para diez variables fenotípicas.....	67
A.5	Media de rendimiento de grano de los primeros 161 híbridos.....	68

## INDICE DE FIGURAS

Figura		Pagina
4.1	Biplot AMMI construido con valores de ACE de 16 líneas cruzadas con cuatro probadores.....	41
4.2	Biplot AMMI construido con valores estandarizados de diez variables respuesta estimadas en 282 híbridos.....	43
4.3	Biplot GGE basado en valores de índice de selección de 282 híbridos estimados por localidad.....	52
4.4	Ampliación del biplot GGE correspondiente a la figura 4.3.....	53

## I. INTRODUCCIÓN

La selección de progenitores e híbridos sobresalientes para más de una variable agronómica es una práctica común dentro de los programas de mejoramiento, debido a que características como altura de planta y mazorca, precocidad y resistencia a plagas y enfermedades, a más de rendimiento, son importantes al momento de la selección.

Seleccionar para cada una de las variables agronómicas de forma consecutiva hasta obtener la ganancia deseada es posible pero presenta el inconveniente del tiempo y el costo que toma llevarlo a cabo; además de que estas variables deben ser tomadas en cuenta al momento de la elección de progenitores para la formación de nuevos híbridos, por tanto el método índices de selección propuesto originalmente, como una función discriminante por Smith (1936) ha sido aplicado en investigaciones a través del tiempo donde ha mostrado ser de utilidad para la selección de material genético en base a más de una característica.

La elección de variables agronómicas para la construcción de un índice de selección no debe descuidarse; al respecto Baker (1986) menciona que la inclusión de variables altamente correlacionadas en un índice puede conducir a muy poca respuesta a la selección debido al incremento de error de muestra. Las características deben ser incluidas en un índice de selección solamente si puede ser esperado que tengan contribución no trivial

con el valor genotípico y se espere que proporcionen información acerca del valor genotípico que no sea ya suministrado por otra característica.

Además de los índices de selección existen métodos que asisten eficientemente la selección de individuos evaluados a través de ambientes, tales como el modelo de regresión en los sitios (SREG) presentado por Yan *et al.* (2000) el cual es construido por los dos primeros componentes centrales (PC1 y PC2) simétricamente escalados derivados de la descomposición del valor singular de los datos de las pruebas de multi-localidades centradas en el ambiente, el cual muestra gráficamente los efectos de genotipo (G) más el de la interacción (GE).

Los gráficos biplot no solamente pueden ser utilizados en pruebas de multi-ambientes Yan y Hunt (2002) mencionan que aunque la metodología del biplot GGE fue desarrollada para pruebas de multi-ambientes debe ser aplicable a todos los tipos de datos bidireccionales que asumen una estructura de doble entrada. Yan y Rajcan (2002) aplicaron la metodología del biplot GGE para generar un biplot de genotipo por característica (GT por sus siglas en inglés) el cual mostró correctamente las relaciones entre las características de un cultivo de soya facilitando la comparación visual y la selección. Esta misma metodología fue aplicada en avena por Yan y Frégeau (2008) como una herramienta para auxiliar la selección de características. Narro *et al.*, (2003) utilizaron los modelos AMMI y SREG para estudiar ACG de líneas y probadores y ACE de la interacción L x P (línea x probador). El biplot SREG contiene los efectos de líneas más la interacción L x P y muestra ambos ACG y ACE, mientras que el biplot AMMI contiene el

efecto de la interacción L x P y muestra solo ACE; sus conclusiones fueron que ambos modelos proporcionan una herramienta efectiva para visualizar y estudiar ACG y ACE de genotipos.

Una vez que el material genético es seleccionado este debe ser integrado dentro de grupos heteróticos, ya que esta estrategia está dirigida a la formación exitosa y rápida de híbridos nuevos. Comúnmente para la afiliación y discriminación de líneas se emplean probadores de selecta y estrecha base genética como son las líneas y cruzas simples de comportamiento genético superior que dan origen a los mejores híbridos dentro de un programa de mejoramiento.

Por lo tanto la selección es una tarea de doble finalidad ya que se utiliza primeramente para identificar padres con características fenotípicas y genéticas excepcionales; y segundo, para identificar híbridos que cubran criterios mínimos plasmados en los objetivos del programa (Yan y Frégeau 2008). El propósito de esta investigación fue el análisis del comportamiento de 282 híbridos y el potencial genético de sus progenitores, los cuales fueron evaluados en tres localidades.

## **Objetivos**

- 1.- Explorar la interacción de probadores con líneas, para ubicar a las líneas bajo estudio en grupos heteróticos.
  
- 2.- Visualizar tendencias naturales de agrupación de respuestas correlacionadas entre variables agronómicas para construir un índice de selección.
  
- 3.- Selección de líneas auxiliado por un índice de selección construido con efectos de ACG e híbridos con base en la estabilidad del valor de un índice de selección construido con valores fenotípicos.
  
- 4.- Selección de probadores como progenitores y para discriminación de líneas.
  
- 5.- Comparar el índice de selección de Elston con el índice de selección de Barreto.

## **Hipótesis**

El modelo AMMI como herramienta para visualizar patrones generales e interacciones específicas de conjuntos de datos, permitirá identificar probadores contrastantes para afiliar adecuadamente a líneas dentro de un grupo heterótico; y visualizar tendencias naturales de agrupación de respuestas correlacionadas entre variables agronómicas para construir un índice de selección.

La aplicación de una propuesta de índices de selección adecuada permitirá detectar de forma eficiente las diferencias existentes entre líneas e híbridos, por lo que se podrá identificar a los mejores individuos.

## II. REVISION DE LITERATURA

### Línea por probador

El diseño línea x probador es una metodología que además de ser útil en la estimación de la significancia de las diferencias entre padres y sus cruza, proporciona información de la aptitud combinatoria general y específica.

Pavan *et al.* (2011) mencionan que línea x probador es un eficiente procedimiento que permite la inclusión de un gran número de líneas y proporciona estimados confiables de componentes genéticos, estimados de aptitud combinatoria y acción de genes gobernando una característica compleja.

Meseka e Ishaq (2012) indican que los análisis de línea x probador proporcionan información acerca de aptitud combinatoria general y específica de los padres el cual es de ayuda en la estimación de varios tipos de efectos genéticos.

Kanagarasu *et al.* (2010) usaron un análisis de línea x probador para determinar aptitud combinatoria para rendimiento y características componentes del rendimiento de 72 híbridos resultantes del cruzamiento de 24 líneas y tres probadores, determinando al mejor probador con aptitud

combinatoria general y tres cruzas con efectos superiores de ACE para rendimiento de grano, tamaño de mazorca y granos por hilera.

Camdzija *et al.* (2012) realizaron un análisis de línea x probador con el objetivo de determinar aptitud combinatoria general y específica de líneas endogámicas de maíz pertenecientes al Instituto de Investigación de Maíz Zemun Polje. Obteniendo débil variación en ACG y ACE encontrando sólo un probador que mostró valores significativos de ACG y su uso fue propuesto en selección de maíz.

Iqbal *et al.* (2007) aplicaron un análisis de línea x probador para evaluar efectos de habilidad combinatoria en 45 híbridos generados por el cruzamiento de 15 líneas con 3 probadores adaptados, encontrando gran contribución de las líneas a la varianza de ACG para todas las características, 3 líneas con buena combinación para rendimiento y características atribuidas al rendimiento, un probador con alta combinación para rendimiento de grano y número de hileras por mazorca, y 5 híbridos con efectos significativos de ACE para rendimiento y a características atribuidas al rendimiento.

Hefny (2010) estudió los efectos de habilidad combinatoria de 13 líneas y 2 probadores bajo un esquema de línea x probador para rendimiento y sus componentes, encontrando 5 líneas con efectos deseables de ACG para rendimiento, algunos componentes de rendimiento y características de floración, y determinó que estos padres pueden ser cruzados con otras líneas para desarrollar precocidad en maduración y alto rendimiento.

Sofi y Rather (2006) condujeron un estudio para caracterizar la arquitectura genética de varias cruzas, de líneas locales y del CIMMYT usando el modelo de línea x probador, encontrando varianzas significativas debidas a ACG y ACE para todas las características con preponderancia de ACG y predominancia de componentes no aditivos.

### **Aptitud combinatoria**

Es la capacidad que tiene un genotipo de producir descendencia caracterizada por la fuerte expresión de una característica, y es medida por el comportamiento promedio del genotipo cuando es cruzado con otros genotipos. La aptitud combinatoria general se refiere a cuando el genotipo es cruzado con otros materiales genéticos y es determinada en relación a sus descendientes para una característica en particular, se considera importante cuando el genotipo produce en general buenos híbridos. La aptitud combinatoria especifica se refiere al cruzamiento de genotipos determinados y se considera importante cuando el híbrido producido tiene un desempeño mejor al esperado o predicho.

Ramírez *et al.* (1998) reportan que la obtención de líneas endogámicas con buena capacidad de combinación y alta calidad agronómica que maximicen la redituabilidad en la producción de semillas, es la meta de los mejoradores de maíz en la formación de variedades mejoradas para uso comercial. Sin embargo, la integración de estos dos componentes en la selección de líneas se dificulta por el costo elevado en la evaluación de líneas *per se* y en cruzas de prueba, para medir su calidad agronómica de combinación respectivamente.

Mediante la determinación de la aptitud combinatoria de los progenitores, el mejorador logra mayor eficiencia en su programa de mejoramiento, pues le permite seleccionar padres con un comportamiento promedio aceptable en una serie de cruzamientos e identificar combinaciones específicas con un comportamiento superior, con base en el promedio de los progenitores que intervienen en el cruzamiento (Guillen *et al.*, 2009).

Camdzija *et al.* (2012) mencionan que la estimación de aptitud combinatoria de líneas endogámicas de maíz contribuye a la revelación de antecedentes genéticos de los genotipos desconocidos y/o insuficientemente estudiados, obteniendo datos cuyos resultados pueden ser usados en el desarrollo de nuevos híbridos. Los genotipos observados con los más altos valores de habilidad combinatoria, pueden dar resultado en el mejoramiento de híbridos cuando ellos son cruzados a otros materiales de la colección de germoplasma de maíz

Trifunovic *et al.* (2003) mencionan que la aptitud combinatoria es la habilidad relativa de un genotipo para transmitir su desempeño a sus cruza. La varianza debida a la aptitud combinatoria general (ACG) es usualmente considerada para ser un indicador de la extensión de la acción de genes de tipo aditivo, mientras que la aptitud combinatoria específica (ACE) es tomada como la medida de la acción de los genes de tipo no-aditivo en mejoramiento de heterosis.

Morata *et al.* (2000) indican que la aptitud combinatoria de líneas endocriadas es un factor determinante de su utilidad en la formación de

híbridos. Por su parte, Sierra *et al.* (2000) indican que además de ACG es necesario discriminar líneas en base a su comportamiento *per se* desde el punto de vista de su rendimiento, adaptación y producción de su semilla.

### **Grupos heteróticos**

El establecimiento de grupos heteróticos complementarios que integren un patrón heterótico exitoso es importante dentro de los programas de mejoramiento, pues permite la formación de híbridos con desempeño favorable de forma rápida y simple. Además de que el patrón heterótico establecido puede ser utilizado de forma indefinida mientras no se pierda la expresión de aptitud combinatoria.

Reif *et al.* (2005) indican que el concepto de patrones heteróticos ayuda a los mejoradores en la elección de cruzas de progenitores para desarrollo de líneas, también como probadores para evaluar aptitud combinatoria de líneas recién desarrolladas. Además simplifica el manejo y la organización del germoplasma.

Melchinger y Gumber (1998) mencionan que un grupo heterótico puede ser definido como un grupo de genotipos con o sin relación de una misma o diferentes poblaciones, el cual muestra aptitud combinatoria cuando es cruzado con genotipos de otros grupos de germoplasma. Los autores también indica que un patrón heterótico implica pares específicos de grupos heteróticos, los cuales pueden ser poblaciones o líneas que expresan alta o favorable heterosis y, consecuentemente alto rendimiento del híbrido en sus cruzas

Gerdes y Tracy (1993) mencionan que los mejoradores de maíz comúnmente clasifican líneas endogámicas dentro grupos heteróticos basados en información de genealogía y/o habilidad combinatoria. Estos grupos heteróticos influyen en cómo el germoplasma es usado, y ha incrementado la eficiencia de los programas de mejoramiento. El patrón heterótico más ampliamente reconocido y explotado en la faja maicera en E.U., es Reid Yellow Dent por Lancaster Sure crop.

Los mejoradores de maíz han confiado en la explotación y el mantenimiento de dos o más grupos heteróticos de mejoramiento en el desarrollo de líneas e híbridos subsecuentes. El reconocimiento y uso de grupos heteróticos ha contribuido a la eficiencia y éxito de los programas de mejoramiento de maíz (Gerdes y Tracy., 1993)

Xia *et al.*, (2005) mencionan que en maíz templado como en el germoplasma de la faja maicera de E.U., un claro patrón heterótico (Reid Stiff Stalk vs. Lancaster) fue establecido tempranamente y líneas endogámicas como B73 y Mo17 de los dos grupos heteróticos fueron elegidas como probadores para la selección de nuevas líneas de maíz. El uso de probadores representativos permite el acomodo de una línea nueva dentro del apropiado grupo heterótico usando sólo un pequeño número de cruza de campo.

La llave al éxito para un programa de mejoramiento es identificar posibles grupos heteróticos que permitan la realización de heterosis de una manera confiable cuando sean cruzados (Şakiroğlu y Brummer, 2007).

## Índices de selección

Cuando la selección en una especie de cultivo involucra varias características el uso de un índice de selección debe ser tomado en cuenta, debido a que esta metodología incluye la combinación de distintas características, de tal forma que cada individuo tiene un valor índice sobre el que la selección es aplicada como si fuera una característica simple.

La selección simultánea de múltiples características se puede utilizar para evitar la disminución de los niveles de aquéllas que están asociadas de forma negativa con la característica a seleccionar, que resulta de la selección de caracteres individuales. Para realizarla, se puede diseñar y emplear varios índices de selección; la eficiencia de éstos será afectada por el número de características involucradas y sus asociaciones con otras, la variabilidad y heredabilidad para cada característica, y la intensidad de selección utilizada para cada una de ellas (Dolan *et al.*, 1996).

Yan and Frégeau (2008) concluyen que la selección basada en múltiples características es un tema inevitable para todos los mejoradores, ya que además de rendimiento y calidad, también son objetivos esenciales de mejoramiento la resistencia a plagas y características agronómicas que determinen la adaptación y estabilidad.

Los mejoradores comúnmente consideran varias características interrelacionadas, y la confianza de predicción (repetitividad) cuando se evalúan cultivares. De tal forma, los índices de selección son el método cuantitativo para integrar estos datos (Milligan *et al.*, 2003). Por su parte,

Cerón *et al.* (2006) indican que en el mejoramiento de plantas, los índices de selección (IS) ayudan a identificar los mejores individuos para el siguiente ciclo de selección sobre la base de los valores fenotípicos observados para varias características de cada candidato en un solo índice, es decir, individualmente.

Sharma y Duveiller (2003) condujeron un estudio en trigo para seleccionar líneas resistentes a *Helminthosporium leaf blight* para determinar si tres características: área bajo la curva del progreso de la enfermedad como evaluación de la severidad de la enfermedad, días a espigamiento y peso de mil semillas podían ser mejoradas simultáneamente con un índice de selección. Los resultados que obtuvieron sugieren que la selección para maduración temprana, líneas de trigo con resistencia-HLB con alto rendimiento de grano y peso de semilla es posible con un índice de selección.

El método de índices de selección es ampliamente utilizado con la finalidad de auxiliar la selección de líneas e híbridos, debido a que los índices de selección (IS) condensan información de distintas fuentes y características en un solo valor para cada individuo. Luego la selección procede como si este valor fuera una característica simple (Barreto *et al.* 1991).

Baker (1986) menciona que en la mayoría de los programas de mejoramiento de cultivos hay una necesidad para mejorar más de una característica a la vez y que el reconocimiento de que el mejoramiento de una característica puede causar mejoramiento o deterioración en

características asociadas sirve para enfatizar la necesidad para simultaneas consideraciones de todas las características que son importantes en especies de cultivo, este mismo autor indica que los índices de selección proporcionan un método para el mejoramiento de dos o más características en un programa de mejoramiento.

Hallauer y Miranda (1981) mencionan que el uso de un índice de selección es más adecuado para animales y especies de cultivo donde los valores relativos de cada característica es fácilmente determinada a través de su valor económico. También indican que la precisión en los estimados de varianza y covarianzas, que generalmente son bajos limita el uso de índices de selección.

Suwantarandon et al (1975) usaron respuestas genéticas esperadas para comparar tres métodos de índices de selección el convencional, el índice base y el índice de selección modificado en programas de selección recurrente en maíz, utilizando siete variables agronómicas para la construcción de los tres índices de selección para selección de  $S_1$ . Los resultados fueron que el índice base en el cual se usaron pesos económicos relativos fue 95 y 97% tan eficiente como el índice de selección convencional y puede ser preferible cuando valores económicos relativos precisos son conocidos, el índice de selección modificado fue 46 y 61% tan eficiente como el índice de selección convencional y se recomienda su uso sólo cuando los valores económicos relativos de las características son difíciles de determinar.

Coterill (1985) condujo un estudio para *Pinus radiata* y *P. caribea* donde realizó la comparación de tres índices de selección el convencional desarrollado por Smith y Hazel, y dos índices simples el índice base que es la suma de los productos de los pesos económicos y los valores fenotípicos para cada característica y el índice de Elston que es el producto de los valores fenotípicos menos el mínimo observado para cada característica. Encontrando que con correlaciones genéticas y fenotípicas adversas los índices simples llevan a bajas ganancias esperadas en algunas características y diferentes grupos de individuos son elegidos como el mejor, sin embargo donde las características son positivamente asociadas todos los índices producen similares ganancias esperadas y grupos similares de individuos seleccionados como el mejor.

### **Biplots (AMMI y SREG)**

Un gráfico biplot es el resultado del producto de dos matrices o tabla bidireccional y es considerado un gráfico de dispersión que muestra la puntuación de los ambientes y genotipos involucrados en el análisis. La interpretación del biplot AMMI y del GGE del modelo SREG es similar. Los vectores de ambientes y genotipos son representaciones de su puntuación, que inician en el origen del gráfico y terminan en la puntuación del ambiente o genotipo y, el ángulo entre vectores es una aproximación de la relación que guardan entre sí.

Yan y Hunt (2002) indican que el concepto de biplot fue desarrollado por Gabriel (1971) para gráficamente mostrar una matriz de rango 2, la cual es una matriz del resultado de multiplicar una matriz con dos columnas por

una matriz con dos filas. El significado de este concepto es que un conjunto de datos de doble sentido puede ser suficientemente aproximado por una matriz de rango 2, entonces puede ser gráficamente mostrado e investigado.

Samonte *et al.* (2005) indican que el análisis del modelo AMMI combina el análisis de varianza (con parámetros aditivos) y PCA (con parámetros multivariados) dentro de un solo análisis.

Naveed *et al.* (2007) reportaron que el modelo AMMI no sólo permite estimar estabilidad si no también clasificar ambientes y la asociación de materiales genotípicos con ambientes específicos y se utiliza mucho en ensayos multi-ambientales con varios genotipos, analiza los efectos aditivos de genotipos (G) y localidades (L) por un análisis estándar de varianza y los efectos multiplicativos de la interacción GxE utilizando el análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en ingles).

Vargas *et al.* (2001) mencionan que el modelo AMMI describe la interacción tratamiento por ambiente (T x E por sus siglas en ingles) en más que una dimensión, y ofrece mejores oportunidades para el estudio e interpretación de la interacción T x E que el análisis de varianza y de la media.

Yan *et al.* (2000) propusieron el modelo SREG y su biplot GGE el cual es construido por los dos primeros componentes centrales (PC1 y PC2) simétricamente escalados derivados de la descomposición del valor singular de los datos de las pruebas de multi-localidades centradas en el ambiente, el

cual muestra gráficamente los efectos de genotipo (G) más el de la interacción (GE).

Ibáñez *et al.* (2006) mencionan que el modelo de regresión de sitios (SREG) se utiliza para el análisis de los datos provenientes de ensayos comparativos de rendimientos multi-ambientales, en especial cuando el ambiente (E) es la fuente de variación más importante en relación con la contribución del genotipo (G) y la interacción genotipo-ambiente (GE). Este modelo, que incluye en el término bilineal G+GE, proporciona un análisis gráfico del comportamiento (rendimiento y estabilidad) de los genotipos. Este gráfico permite identificar el genotipo de mayor potencial en cada ambiente y agrupar genotipos y ambientes con patrones similares de respuesta.

Para Annichiarico (2002) la alta estabilidad de rendimiento usualmente se refiere a genotipos con capacidad para actuar de forma constante, ya sea en altos o bajos niveles de rendimiento a través de un amplio rango de ambientes.

Lee *et al.* (2003) mencionan que la estabilidad es influenciada en parte por la estructura genética, el nivel de heterogeneidad y la heterocigosidad del material genético. Sin embargo, muy poco se sabe acerca de los componentes genéticos que subyacen a la estabilidad y cómo las estrategias de mejoramiento de la población influyen la estabilidad.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo con los materiales, metodologías y análisis estadísticos que se describen a continuación:

#### **Materiales**

El material genético fue constituido por 282 cruzas de prueba formadas durante el ciclo PV-2010 en el estado de Nayarit, entre 109 líneas del Instituto Mexicano del Maíz, cuyas genealogías se describen en el Cuadro 3.1, y seis probadores con buena adaptación al área del sub-tropico: PE-212-1-2-A (P1) y CS8 x ML (P4) pertenecientes al programa, y CS1 (P2), CS2 (P3), LB (P5) y LB2(P6) de germoplasma exótico; los probadores P1, P5 y P6 son líneas, el resto son cruzas simples. Las cruzas entre líneas y probadores fue formada por coincidencias de floración, por lo que no todas las líneas fueron cruzadas con los seis probadores. Los ensayos de evaluación de las 282 cruzas resultantes se evaluaron en tres localidades durante el ciclo PV-2011.

**Cuadro 3. 1 Genealogía de las líneas.**

Línea	Genealogía	Línea	Genealogía
1	((M13xPE-115-3-1-11) x M13)-3-2	40	((M16xE-197) x M16)-14-2
2	((M13xPE-115-3-1-3) x M13)-6-1	41	((M16xE-197) x M16)-2-1
3	((M13xV524-4119HC-43-3-2-4) x V524-4119HC-43-3-2-4-1)-14-1	42	((M16xPE-115-3-1-3) x M16)-1-2
4	((M13xV524-4119HC-43-3-2-4) x V524-4119HC-43-3-2-4-1)-19-A	43	((M1xE-197) x E-197-6)-8-2
5	((M15xPE-115-3-3-2) x M15)-12-2	44	((M29xE-197) x M29)-11-1
6	((M16xE-195) x M16)-15-3	45	((M35xPE-112-7-A-A-4-2) x M35)-18-3
7	((M16xE-197) x M16)-15-2	46	((M35xPE-112-7-A-A-4-2) x M35)-19-2
8	((M16xE-197) x M16)-6-1	47	((M35xPE-112-7-A-A-4-2) x M35)-7-5
9	((M16xPE-115-3-1-3) x M16)-1-1	48	((M35xPE-115-3-1-10) x M35)-15-1
10	((M1xE-197) x E-197-6)-11-2	49	((M41xPN-311-2-A-3-6) x PN-311-2-A-3-6-A)-18-1
11	((M31xE-197) x E-197-6)-16-1	50	((M41xPN-311-2-A-3-6) x PN-311-2-A-3-6-A)-18-2
12	((M31xE-197) x E-197-6)-19-2	51	((M5xPE-115-3-3-2) x M5)-12-2
13	((M35xPE-112-7-A-A-4-2) x M35)-7-1	52	((M6xPE-212-1) x M6)-4-1
14	((M35xPE-115-3-1-10) x M35)-13-1	53	((M7xE-197) x E-197-6)-4-4
15	((M41xPN-311-2-A-3-6) x PN-311-2-A-3-6-A)-10-3	54	((M7xE-197) x E-197-6)-7-4
16	((M6xPE-212-1) x M6)-16-1	55	((M7xV524) x M7)-1-1
17	((M7xE-197) x M7)-16-2	57	((M7xV524-4119HC-218-3 x V524-4119HC-218-3-2)-13-2
18	((M7xV524) x M7)-14-2	58	(CML-373 X AN7 R-25-3-1-2-A)-A-A-7-3
19	((M7xV524-4119HC-218-3 x V524-4119HC-218-3-2)-14-1	59	(LEOPRECOZxPN-308-2)-42-A-A-6
20	((M7xV524-4119HC-218-3 x V524-4119HC-218-3-2)-18-1	60	(M15 x CML-11-3)-3-1
21	((M7xV524-4119HC-218-3 x V524-4119HC-218-3-2)-6-1	61	(M16 x (PE-203-2xPE-105-1)-1-A-7-3-5)-10-4
22	(CML-373 X AN7 R-25-3-1-2-A)-A-A-10-1	62	(M19 x (PE-106-8xLBPC4S4)-2-A-2-1-3)-8-1
23	(LEOPRECOZxPN-308-1)-11-A-A-2	63	(M42 x 255-18-19N-14-1-A-4-2-A-7)-16-2
24	(M13 x 232-10-11-1-A)-2-2	64	(M42 x 255-18-19N-14-1-A-4-2-A-7)-16-4
25	(M15 x E-195-5)-2-3	65	(M47 x 351-296-1-6-A)-1-2
26	(M47 x 351-296-1-6-A)-17-2	66	(M47 x 351-296-1-6-A)-20-1
27	(M47 x 351-296-1-6-A)-20-3	67	(M47 x 351-296-1-6-A)-2-2
28	(M47 x 351-296-1-6-A)-6-3	69	(M7 x 43-46-2-3-2)-4-2
29	(M7 x 43-46-2-3-2)-10-2	70	351-296-1-6-A-A
30	(M7 x 43-46-2-3-2)-10-4	71	LEOPRECOZ-8-3-A-A-2
31	(M7 x 43-46-2-3-2)-14-1	72	LEOPRECOZ-8-3-A-A-4
32	(M7 x 43-46-2-3-2)-14-2	73	MLS4-1 RC4N-7-1-1 X 53-36-37-N-10-2-A-1-1-A-1
33	((M22xPE-115-3-1-11) x M22) x M22)-12	74	((M1xE-197) x E-197-6)-15-2
34	((M13xV524-4119HC-43-3-2-4) x V524-4119HC-43-3-2-4-1)-9-1	75	((M35xPE-112-7-A-A-4-2) x M35)-14-1
35	((M15xPN-311-2-A-3-6) x PN-311-2-A-3-6-A)-4-2	76	((M35xPE-112-7-A-A-4-2) x M35)-4-1
36	((M16xE-195) x M16)-11-1	77	((M35xPE-115-3-1-10) x M35)-13-2
38	((M16xE-197) x E-197-1)-12-5	79	((M41xPN-311-2-A-3-6) x PN-311-2-A-3-6-A)-7-5
39	((M16xE-197) x M16)-13-3	80	((M4xV524-4119HC-43-3-2-4) x V524-4119HC-43-3-2-4-1)-6-2

## Continuación Cuadro 3.1

**Cuadro 3.1 Genealogía de las líneas**

Línea	Genealogía	Línea	Genealogía
81	((M6xPE-212-1) x M6)-16-4	98	((M1xE-197) x E-197-6)-11-2
82	((M7xE-197) x E-197-6)-7-1	99	((M5xPE-115-3-3-2) x M5)-6-1
83	((M7xV524) x M7)-6-2	100	((M7xV524) x M7)-3-1
84	(LEOPRECOZxPN-308-1)-11-A-A-1	101	((M7xV524) x M7)-5-1
85	(M15 x CML-11-3)-5-2	102	(CML-373 X AN7 R-25-3-1-2-A)-A-A-10-2
86	(M19 x (PE-106-8xLBCPC4S4)-2-A-2-1-3)-5-2	103	(LEOPRECOZxPN-308-1)-11-A-A-3
87	(M47 x 232-10-11-1-A)-1-7	104	(M15 x E-195-5)-7-1
88	(M7 x 351-296-1-6-A)-20-1	105	(M47 x 232-10-11-1-A)-3-1
89	(M7 x 43-46-2-3-2)-10-1	106	(M7 x 351-296-1-6-A)-6-1
90	(M7 x 43-46-2-3-2)-8-1	107	(M7 x 43-46-2-3-2)-14-3
91	((M22xE-197) x M22) x M22)-3	108	((M1xE-197) x E-197-6)-11-1
92	Línea C	109	(M15 x CML-11-3)-5-4
93	((M13xPE-115-3-1-10) x M13)-20-1	110	(M35 x 351-296-1-6-A)-20-4
94	((M15xPN-311-2-A-3-6) x PN-311-2-A-3-6-A)-4-2	111	MLS4-1
95	((M7xV524-4119HC-218-3 x V524-4119HC-218-3-2)-5-1	112	((M16xE-197) x E-197-1)-15-1
96	(M15 x E-195-5)-7-1	113	((M31xE-197) x E-197-6)-12-1
97	((M16xE-197) x M16)-13-1		

## Descripción de los ambientes de evaluación

La evaluación de los híbridos se realizó en las localidades de El Prado, Galeana, NL., Silao y Jaral, Gto., cuya descripción se muestra en el Cuadro 3.2.

**Cuadro 3. 2 Situación geográfica y características climáticas de los ambientes de evaluación: Silao Gto., Jaral del progreso Gto., y El Prado, Galeana Nuevo León.**

Ambiente	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (msn)	Temperatura media Anual (°c)	Precipitación Media Anual (mm)
Silao Gto.	20° 56'	100° 25'	1780	18 °C	600 a 800
Jaral del Progreso Gto.	20° 26'	101° 07'	1730	18.5 °C	647.9
El Prado Nuevo León	24° 12'	100° 05'	1890	18 °C	300

### **Descripción de la parcela experimental**

El diseño de siembra utilizado para el experimento fue un bloques incompletos al azar con arreglo alfa látice con dos repeticiones por localidad, la parcela experimental para la localidad de El Prado fue de un surco de 5 metros de largo y 0.90 metros entre surcos con 40 plantas, en las localidades de Silao y Jaral la parcela experimental fue de dos surcos de 5 metros de largo y 0.75 metros entre surcos.

### **Labores culturales**

**Preparación del terreno:** El terreno en todas las localidades fue preparado de la siguiente manera: se inició con un subsoleo, posteriormente se efectuaron dos pasos de rastra y un riego de pre-siembra.

**Siembra:** Para la localidad de El Prado, la siembra fue realizada de forma manual mientras que para las localidades de Silao y Jaral se llevo a cabo con una sembradora de precisión.

**Fertilización:** La dosis de fertilización para la localidad de El Prado fue de 120-60-60, y para las localidades de Silao y Jaral fue de 180-90-90. En los tres casos se aplicó la mitad del nitrógeno y todo el fosforo al momento de la siembra, el resto del nitrógeno cuando se realizó el primer cultivo.

**Riegos:** Los riegos en todas las localidades fueron aplicados de la siguiente manera: un riego después de la siembra para garantizar la germinación y el desarrollo del material sembrado, posteriormente los riegos se suministraron de acuerdo a las necesidades del cultivo presentadas de acuerdo a las condiciones climáticas de cada localidad. En general se aplicaron cuatro riegos adicionales al de siembra.

**Control de malezas:** Se llevó a cabo al momento en que la maleza emergió en el terreno mediante la aplicación de atrazina (nombre comercial: Gesaprim Calibre 90).

**Control de plagas:** Para evitar la presencia de insectos plaga se realizaron las siguientes aplicaciones: clorpirifos (nombre comercial: Lorsban 30) al momento de la siembra para daños en raíz, cipermetrina (nombre comercial: Arrivo 200 CE) en las etapas iniciales de desarrollo vegetativo para control de gusanos trozadores, permetrina (nombre comercial: Ambush 50) para daños foliares

**Cosecha:** Se realizó por parcela de forma manual en la localidad de El Prado y de forma mecánica con una cosechadora combinada integrada con báscula y determinador de humedad en las localidades de Silao y Jaral.

## **Variables fenotípicas evaluadas**

### **Fenológicas**

**Días a floración masculina (FM):** Se registraron los días transcurridos desde el primer riego hasta la fecha en que un mínimo del 50% de las plantas por surco presentaron emisión de polen.

**Días a floración femenina (FF):** Se registraron los días transcurridos desde el riego de siembra hasta la fecha cuando un mínimo del 50% de las plantas por surco mostraron estigmas receptivos.

### **Agronómicas**

**Altura de planta (AP):** Es la distancia en centímetros desde la base de la planta hasta el final de la espiga.

**Altura de mazorca (AM):** Es la longitud en centímetros desde la base de la planta hasta el nudo de inserción de la mazorca principal.

**Calificación de planta (CP):** Es la calificación visual de las plantas por parcela en base a una escala previamente establecida que va del 1 al 5 donde 1 corresponde al mejor intérprete de las características incluidas dentro de la escala y 5 corresponde al peor.

**Número de plantas (NP):** Es el total de plantas observables por parcela experimental.

## **Fitosanitarias**

**Acame de raíz (AR):** Es el por ciento de plantas acamadas por parcela, considerando aquellas en las que la parte más baja del tallo forma un ángulo de 45° o menos con la superficie del suelo.

**Acame de tallo (AT):** Es el por ciento de plantas acamadas por parcela, considerando aquellas en las que el tallo se quebró por debajo de la inserción de la mazorca y la porción quebrada formó un ángulo de 45° o menos con relación al suelo.

**Plantas con daño por *fusarium spp.* (PF):** Es el por ciento de plantas muertas por parcela, considerando aquellas que murieron debido al daño causado a la raíz de la planta por el hongo.

## **Componentes de rendimiento**

**Rendimiento de grano (RG):** Es la producción estimada por parcela experimental en  $\text{tha}^{-1}$  de grano al 15.5 % de humedad. Este dato se obtuvo al multiplicar el peso seco (PS) por un factor de conversión (FC).

**Porcentaje de humedad (%H):** Fue tomada en mazorca al momento de la cosecha del grano con el determinador de humedad Dickie Johnson.

$$PS = \frac{(100 - \%H)}{100} \times PC \quad \text{Donde:}$$

%H = Porcentaje de humedad del grano a la cosecha por parcela y PC  
= Peso de campo en kg.

$$FC = \frac{10000}{APU \times 0.845 \times 1000}$$

APU = Área de parcela útil. Es el producto de la distancia entre surcos por la distancia entre matas por el número exacto de plantas por parcela; 0.845 = constante para transformar el rendimiento de peso seco al 15.5 % de humedad; 1000 = Constante para obtener el rendimiento en t ha<sup>-1</sup>, y 10000 = Valor correspondiente a la superficie de una hectárea en m<sup>2</sup>.

### **Diseño experimental y análisis de datos**

El diseño experimental utilizado fue bloques incompletos al azar con arreglo alfa látice con dos repeticiones por localidad. El análisis de los datos se realizó con el uso del paquete estadístico SAS (SAS, 2002).

### **Análisis de varianza general**

El análisis de varianza se realizó con el objetivo de conocer el comportamiento de las cruzas de prueba y determinar diferencias estadísticas entre ambientes, cruzas de prueba y la magnitud de la interacción entre ambientes y cruzas de prueba, con base al siguiente modelo lineal:

$$Y_{ijkl} = \mu + l_i + r_{j(i)} + b_{k(j)} + t_l + lt_{il} + \varepsilon_{ijkl}$$

Dónde:

$Y_{ijkl}$  = es el valor observado en la i-ésima localidad, la j-ésima repetición dentro de la i-ésima localidad, el k-ésimo bloque incompleto dentro

de la  $j$ -ésima repetición y el  $l$ -ésimo genotipo;  $\mu$  = efecto de la media general;  $l_i$  = efecto de la  $i$ -ésima localidad;  $r_{j(i)}$  = efecto del  $j$ -ésima repetición;  $b_{k(j)}$  = efecto del  $k$ -ésimo bloque incompleto dentro de la  $j$ -ésima repetición ;  $t_l$  = efecto del  $l$ -ésimo genotipo;  $lt_{il}$  = efecto de la interacción entre la  $i$ -ésima localidad y el  $l$ -ésimo genotipo;  $\varepsilon_{ijkl}$  = efecto del error.

Con la finalidad de conocer el comportamiento y las diferencias entre líneas, probadores y sus respectivas cruzas, además de la habilidad combinatoria general y específica de líneas y probadores se utilizó el modelo de línea por probador.

### **Línea por probador**

Se utilizó la metodología de línea por probador descrita por Singh y Chaudhary (1979) el cual es una herramienta útil en la estimación de efectos de aptitud combinatoria general de líneas y probadores, y del efecto de aptitud combinatoria específica de sus cruzas. Cuyo modelo es el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_{j(i)} + L_k + P_l + LP_{kl} + AL_{ik} + AP_{il} + ALP_{ikl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Dónde:

$Y_{ijkl}$  = variable de respuesta;  $\mu$  = efecto de la media general;  $A_i$  = efecto del  $i$ -ésimo ambiente;  $B_{j(i)}$  = efecto del  $j$ -ésimo bloque dentro del  $i$ -ésimo ambiente;  $L_k$  = efecto de la  $k$ -ésima línea;  $P_l$  = efecto del  $l$ -ésimo probador;  $LP_{kl}$  = efecto de la  $k$ -ésima línea por el  $l$ -ésimo probador;  $AL_{ik}$  = efecto de la  $k$ -ésima línea por el  $i$ -ésimo ambiente;  $AP_{il}$  = efecto del  $l$ -ésimo

probador por el i-ésimo ambiente;  $ALP_{ikl}$  = efecto de la k-ésima línea por el l-ésimo probador por el i-ésimo ambiente;  $\varepsilon_{ijkl}$  = efecto del error.

Estimación de ACG:

Para líneas:

$$g_i = \frac{x_{i..}}{tr} - \frac{x_{...}}{ltr}$$

Para probadores:

$$g_j = \frac{x_{.j.}}{lr} - \frac{x_{...}}{ltr}$$

Dónde:

$x_{i..}$  = total de la línea;  $x_{.j.}$  = total del probador;  $x_{...}$  = gran total o media general;  $l$  = línea;  $t$  = probador;  $r$  = repetición.

Estimación de ACE para cruza L x P:

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

$x_{ij.}$  = línea por probador;  $x_{i..}$  = total de la línea  $x_{.j.}$  = total del probador;  $x_{...}$  = gran total o media general;  $l$  = línea;  $t$  = probador;  $r$  = repetición.

Con el propósito de determinar patrones de respuesta para la formación de grupos heteróticos con base en probadores, y de elegir variables para la construcción de un índice de selección se aplicó el modelo AMMI.

## **Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) y su gráfico Biplot**

El modelo **AMMI** es una herramienta útil para visualizar los patrones generales del conjunto de datos también como sus interacciones específicas.

### **Exploración de la interacción de probadores con atención a los efectos de ACE**

Con la intención de detectar probadores contrastantes que permitan afiliar a las líneas bajo estudio dentro de grupos heteróticos complementarios se realizó una exploración de la interacción de línea por probador en base a efectos de aptitud combinatoria específica (ACE), para la variable rendimiento de grano de 16 líneas (5, 6, 8, 17, 19, 20, 22, 24, 27, 28, 41, 45, 46, 50, 61, 73) que fueron cruzadas con los probadores PE-212-1-2-A (P1) , CS8 x ML (P4) , CS1(P2), CS2 (P3). Cuando el biplot es aplicado a datos de línea por probador el término rendimiento es ACE y la estabilidad es un aproximado de ACG; para mostrar el biplot genotipo por probador el estudio se efectuó mediante el modelo y la rutina de programación descrita por Vargas y Crossa (2000) bajo el siguiente modelo matemático:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + R_{ij}$$

Dónde:  $Y_{ij}$  = ACE del i-ésimo genotipo en el j-ésimo probador;  $\mu$  = media general;  $g_i$  = efecto del i-ésimo genotipo;  $e_j$  = efecto del j-ésimo probador;  $\lambda_k$  = raíz cuadrada del vector característico del k-ésimo eje del ACP;  $\alpha_{ik}$  = calificación del ACP para el k-ésimo eje del i-ésimo genotipo;  $\gamma_{jk}$  = calificación del ACP para el k-ésimo eje del j-ésimo probador;  $R_{ij}$  = residual del modelo con  $\sim DNI\left(\frac{\sigma^2}{r}\right)$ .

### Detección de agrupamientos entre variables

Para la elección de variables se empleó el modelo AMMI y su biplot híbrido por variable, como herramienta para la visualización de las agrupaciones naturales existentes entre grupos de variables con el fin de seleccionar dentro de cada grupo una variable representativa. Los valores fenotípicos de las características días a floración masculina y femenina (FM y FF), altura de planta y mazorca (AP y AM), acame de raíz y tallo (AR y AT), plantas con daño por *fusarium spp* (PF), calificación de planta (CP), rendimiento de grano (RG) y porcentaje de humedad (%H) fueron estandarizados para su análisis.

Para mostrar el biplot genotipo por variable se empleó la rutina de programación descrita por Vargas y Crossa (2000).

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + R_{ij}$$

Los resultados obtenidos mediante los biplots genotipo por probador y genotipo por variable del modelo AMMI serán empleados para la toma de decisiones en la construcción de un índice de selección para líneas e híbridos.

### **Índice de selección de Barreto et al (1991)**

Con el objetivo de obtener una diferenciación confiable de las líneas y sus híbridos en base a dos o más características de forma simultánea se utilizó el índice de selección (IS) descrito por Barreto et al (1991) cuyo modelo es como sigue:

$$Indice = \left[ \left[ (Y_j - M_j)^2 * I_j \right] + \left[ (Y_1 - M_1)^2 * I_1 \right] + \dots + \left[ (Y_n - M_n)^2 * I_n \right] \right]^{1/2}$$

Dónde:

$Y_{j\dots n}$  = Es la variable en unidades Z.;  $M_{j\dots n}$  = Es la meta de selección;  $I_{j\dots n}$  = Es la intensidad de selección para las características j, i.....n.

Debido a que las variables descriptivas son de parámetros con unidades distintas (días, toneladas, decímetros, porcentajes y calificaciones visuales) es necesario estandarizar todos los valores para que las distintas características puedan combinarse. Por lo que para cada variable el valor es convertido en su desviación estándar en relación al promedio del grupo, el

cual se conoce en estadística como valor Z Barreto *et al.* (1991) y cuya fórmula es la siguiente:

$$Z = \frac{y_j - \bar{y}}{S}$$

$Z$  = valor estandarizado de variable;  $y_j$  = valor observado de la variable;  $\bar{y}$  = promedio de la variable;  $S$  = desviación estándar de la variable.

Según lo descrito por Barreto *et al.* (1991) es necesario especificar una meta y una intensidad de selección. La intensidad refleja la importancia relativa de las diferentes variables a usarse en la selección. La intensidad puede ser diferente para cada variable, con valores que van de 0 a 10, mientras más grande es el valor de la intensidad mayor es el peso dado a la variable en cuestión.

La meta de selección se encuentra en valores de desviación estándar de la media (valores  $Z$ ) y representa lo que se desea lograr en la selección con valores de -3 a 3. Los valores positivos son para seleccionar genotipos que se encuentran por arriba de la media de la variable, los valores negativos son para seleccionar genotipos que se encuentran por debajo de la media.

$$MD = \frac{Max - \bar{y}}{S}$$

$MD$  = meta deseada;  $Max$  = es el valor deseado de la variable del genotipo, que puede estar por encima o por debajo de la media;  $\bar{y}$  = media de la variable;  $S$  = desviación estándar de la variable de interés.

## **Selección de líneas**

El IS para selección de líneas fue construido en base a valores de habilidad combinatoria general (ACG) estimados a través del modelo línea por probador con las variables seleccionadas mediante el modelo AMMI y su biplot híbrido por variable; para grupos de líneas apareadas con los grupos de probadores detectados por el modelo AMMI y su biplot línea por probador. La estimación de los valores IS se realizó por repetición con el fin de adecuarlo dentro de un modelo de análisis de varianza que aporte elementos para apoyar la hipótesis de que existen diferencias dentro de los índices y realizar la identificación de líneas superiores. Con los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza de los valores índice, se efectuó la identificación de las líneas superiores mediante el valor de la media general del valor índice menos su desviación estándar.

Para hacer un uso más eficiente de las líneas seleccionadas se realizó la clasificación de líneas dentro de grupos heteróticos.

## **Afiliación de líneas dentro de grupos heteróticos**

Las líneas elegidas en base a su valor índice de selección para los grupos de probadores contrastantes, fueron afiliadas dentro de estos grupos mediante efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) para la variable de rendimiento de grano, estimada mediante el modelo línea por probador, la afiliación fue de la siguiente forma: aquellas líneas que combinen bien dentro de su grupo (favorable ACE) pertenecen al grupo contrario y las que no combinen bien (ACE desfavorable) pertenecen a ese mismo grupo.

## Selección de híbridos

El IS para híbridos se realizó en base a los valores fenotípicos de las variables agronómicas seleccionadas mediante el modelo AMMI y su biplot híbrido por variable. Al igual que en selección de líneas, el valor índice fue calculado a través de localidades y repeticiones para adecuarlo dentro de un modelo de análisis de varianza. La selección de híbridos se realizó mediante el análisis de la respuesta a ambientes específicos y estabilidad de los materiales con base al valor índice obtenido, empleando **el modelo de regresión de sitios (SREG)** y la metodología descrita por Burgueño *et al.* (2001) cuyo modelo se presenta a continuación:

$$Y_{ij} = \mu + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + R_{ij}$$

Dónde:  $Y_{ij}$  = valor del índice de selección del i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente;  $\mu$  = media general;  $e_j$  = efecto del j-ésimo ambiente;  $\lambda_k$  = raíz cuadrada del vector característico del k-ésimo eje del ACP;  $\alpha_{ik}$  = calificación del ACP para el k-ésimo eje del i-ésimo genotipo;  $\gamma_{jk}$  = calificación del ACP para el k-ésimo eje del j-ésimo ambiente;  $R_{ij}$  = residual del modelo con  $\sim DNI\left(\frac{\sigma^2}{r}\right)$ .

## **Selección de probadores**

Para facilitar la discriminación de líneas y realizarla sólo en base al potencial de las mismas, a si cómo determinar probadores elite que permitan la formación rápida de nuevo material genético se realizó selección dentro de probadores con la finalidad de determinar características propias de cada probador.

En base al promedio favorable por variable para determinar el potencial de cada probador en la formación de nuevos híbridos, y con efectos de ACG estadísticamente igual a cero estimados mediante el modelo línea por probador y los cuadrados medios del análisis de varianza por probador para definir su uso en la discriminación de líneas, y elegir líneas sólo en base al potencial de las mismas, sin enmascaramiento de sus atributos por parte del probador.

## **Comparación entre el índice de Elston y el Índice de Barreto, y de ambos índices con calificación de planta.**

Se realizó una comparación entre el índice descrito por Barreto et al. (1991) anteriormente definido y el índice descrito por Elston calculado mediante la metodología descrita por Cotterill (1958) cuyo modelo es como sigue:

$$I_e = (P_1 - m_1)(P_2 - m_2) \dots (P_n - m_n)$$

Dónde:  $P_1$  = valor fenotípico;  $m_1$  = valor fenotípico mínimo.

La comparación entre y dentro de los índices se efectuó para los valores obtenidos por cada uno de ellos para ocho variables agronómicas y las variables agronómicas detectadas por el modelo AMMI para determinar si su aplicación es indistinta, es decir si realizan el mismo ordenamiento de los híbridos. También se realizó la comparación del ordenamiento de ambos índices con calificación de planta. Para este efecto se utilizó la correlación de Pearson cuya descripción se presenta a continuación:

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}^2}{S_x S_y}$$

Dónde  $S_{xy}^2$  = covarianza entre dos variables;  $S_x$  = desviación típica de la variable x;  $S_y$  = desviación típica de la variable y.

### **Criterios de selección.**

Para selección de líneas se consideró aquellas que presentaron el mejor índice de selección estimado en base a su aptitud combinatoria general.

Para elección de probadores como progenitores se consideró aquellos con promedio favorable por variable y para discriminación de líneas aquellos con efectos de ACG estadísticamente igual a cero y significancia en sus cuadrados medios.

Para la identificación de nuevos híbridos con mayores posibilidades de explotación comercial se consideró aquellos que mostraron un mejor índice

de selección estimado en base a sus valores fenotípicos y respuesta a la interacción genotipo x ambiente en base al valor al mérito del IS.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de varianza general combinado

Los datos obtenidos fueron sujetos a análisis de varianza para confirmar las diferencias existentes entre los ambientes, los híbridos, y las interacciones involucradas. Los resultados del análisis de varianza general combinado se muestran en el Cuadro 4.1, donde se aprecia que ambientes (A) presentó significancia al ( $P \leq 0.01$ ) para todas las variables, evidenciando las diferencias entre las localidades de evaluación; el análisis también muestra diferencias significativas al ( $P \leq 0.01$ ) en todas las variables para híbridos (HIB) lo cual indica que los híbridos son diferentes en cuanto a desempeño y por lo tanto con respecto a cada variable al menos uno debe ser mejor al resto.

**Cuadro 4. 1 Cuadrados medios del análisis de varianza combinado para diez variables en cruza evaluadas en tres ambientes durante 2011.**

F.V.	G.L.	FM Días	FF Días	AP cm	AM cm	AR %
Ambiente (A)	2	162887.819 **	181818.98 **	832233.759 **	377704.573 **	11981.7888 **
Repetición (rep)	2	11.7215 **	27.4619 *	3286.049 **	60.3917	79.48304
Bloque (BLQ)	18	3.6826	3.5223	417.071 *	127.6047	144.31802 **
Híbridos (HIB)	281	14.7563 **	17.9489 **	566.86 **	634.0122 **	247.15567 **
A x HIB	562	5.0773 **	6.5691 **	216.568	284.8782 *	127.10081 **
Error	879	2.6211	3.1349	235.08	244.069	55.2199
C.V. (%)		2.040102	2.201936	6.413696	12.15564	144.2702
Media		79.35739	80.40893	239.0561	128.5223	5.150757

\*\* y \*, significancia al nivel de  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$  respectivamente; C. V.(%)=coeficiente de variación; F.V.= Fuente de variación, G.L.= Grados de libertad, FM= Floración masculina, FF= Floración femenina, AP= Altura de planta, AM= Altura de mazorca, AR= Acame de raíz.

## Continuación del Cuadro 4.1

**Cuadro 4. 1 Cuadrados medios del análisis de varianza combinado para diez variables evaluadas en tres ambientes durante 2011.**

FV	GL	AT %	PF %	CP Escala	RG (t ha <sup>-1</sup> )	%H %
Ambiente (A)	2	1290.35911 **	1122.62917 **	58.8697874 **	3424.20828 **	17796.2392 **
Repetición (rep)	2	157.036735 **	44.866002 **	6.0576518 **	97.953572 **	79.41055 **
Bloque (BLQ)	18	8.309406	3.637731	0.3113614	4.075002	3.47566
Híbridos (HIB)	281	9.239512 **	5.85789 **	0.7690412 **	10.791572 **	8.4974 **
A x HIB	562	7.677105 **	4.927106 **	0.4758021 **	7.920395 **	5.09767 **
Error	879	6.42546	2.708247	0.3209719	4.64402	3.43357
C.V. (%)		172.6966	71.6314	18.77369	17.59982	12.72501
Media		1.467805	2.297422	3.017755	12.24443	14.56179

\*\* y \*, significancia al nivel de  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$  respectivamente; C. V.(%)=coeficiente de variación; F.V.= Fuente de variación, G.L.= Grados de libertad, AT= Acame de tallo, PF= Plantas con daño por *fusarium spp.*, CP= Calificación de planta, RG= Rendimiento de grano, %H= Porcentaje de humedad.

La interacción entre ambientes e híbridos (AxHIB) presentó significancia al ( $P \leq 0.01$ ) para ocho variables: días a floración masculina y femenina, acame de raíz y tallo, plantas con daño por *fusarium spp.*, calificación de planta, rendimiento de grano y porcentaje de humedad; y al ( $P \leq 0.05$ ) para la variable altura de mazorca, siendo altura de planta la única variable sin significancia. Los resultados indican que los híbridos son diferentes entre sí, y es posible realizar selección entre ellos, sin embargo este análisis sólo proporciona información en lo referente a híbridos y sus interacciones, no en cuanto a las líneas y probadores que les dieron origen, por lo cual se procedió a realizar el análisis de línea por probador.

### **Análisis de varianza línea por probador**

Los resultados del análisis de varianza línea por probador presentados en el Cuadro 4.2 muestran un panorama general de las diferencias existentes entre líneas y probadores para diez variables fenotípicas.

Los ambientes de evaluación presentaron diferencias para todas las variables agronómicas incluidas, además de que fue la fuente de variación que más contribuyó a la variación total del modelo, por lo cual es importante tenerlo en cuenta al momento de tomar decisiones en lo referente a la adaptación de línea o híbridos. Líneas y probadores se comportaron de manera diferente para todas las variables por lo que es factible elegir aquellas que sean superiores en cuanto a estos atributos para la formación y discriminación de nuevo material genético.

La interacción de línea por probador demostró ser de importancia sólo para seis variables: floración masculina y femenina, altura de planta, acame de raíz, rendimiento de grano y porcentaje de humedad, indicando que las líneas no tienen el mismo comportamiento con los diferentes probadores, para las demás variables las diferencias que puedan existir entre híbridos son pequeñas y estadísticamente no significativas.

**Cuadro 4. 2 Cuadros medios del análisis de varianza línea por probador para diez variables evaluadas en tres ambientes durante 2011.**

FV	GL	FM	FF	AP	AM	AR
Ambiente (A)	2	65839.1093 **	73990.6275 **	349029.63 **	165920.964 **	4480.30618 **
Repetición/A	3	20.4032 **	29.9359 **	2500.7159 **	239.1214	57.66552
Línea (L)	108	18.3735 **	19.1981 **	677.3762 **	772.1752 **	169.33208 **
A x L	216	6.8917 **	8.3111 **	195.8725	271.5278	98.36713 **
Probador (P)	5	198.749 **	286.4542 **	5224.752 **	7807.4869 **	6224.80803 **
A x P	10	21.9928 **	36.0029 **	788.3038 **	698.3534 **	2217.83735 **
L x P	168	3.9574 **	4.9843 **	312.1955 **	271.4982	87.5236 **
A x L x P	336	2.8223	3.6787 *	216.6888	277.3424	68.11687 *
Error	897	2.6424	3.1426	238.732	241.732	57.0078
C.V.		2.048375	2.204665	6.463323	12.0973	146.5872
Media		79.35739	80.40893	239.0561	128.5223	5.150757

\*\* y \*, significancia al nivel de  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$  respectivamente; C. V.(%)=coeficiente de variación; F.V.= Fuente de variación, G.L.= Grados de libertad, FM= Floración masculina, FF= Floración femenina, AP= Altura de planta, AM= Altura de mazorca, AR= Acame de raíz.

Continuación del cuadro 4.2

**Cuadro 4. 2 Cuadrados medios del análisis de varianza línea por probador para diez variables evaluadas en tres ambientes durante 2011.**

FV	GL	AT	PF	CP	RG	%H
Ambiente (A)	2	452.345748 **	363.732786 **	22.1387291 **	1488.74577 **	6718.08945 **
Repetición/A	3	108.69672 **	50.914442 **	6.475945 **	133.710522 **	80.94847 **
Línea (L)	109	9.831572 **	7.996389 **	1.0537439 **	12.496037 **	14.53854 **
A x L	218	7.415394	6.301608 **	0.5570648 **	9.410266 **	7.10539 **
Probador (P)	5	86.344565 **	42.79093 **	9.6307163 **	159.161128 **	24.78133 **
A x P	10	42.353188 **	22.678033 **	3.5819225 **	43.375775 **	9.00453 **
L x P	167	6.87735	3.124623	0.3241316	5.739706 *	4.34657 *
A x L x P	334	6.465404	3.442643 **	0.3175608	5.754463 **	4.11563 *
Error	843	6.46327	2.726899	0.3207791	4.6326	3.43441
C.V.		173.2039	71.87764	18.76805	17.57817	12.72657
Media		1.467805	2.297422	3.017755	12.24443	14.56179

\*\* y \*, significancia al nivel de  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$  respectivamente; C. V.(%)=coeficiente de variación; F.V.= Fuente de variación, G.L.= Grados de libertad, AT= Acame de tallo, PF= Plantas con daño por *fusarium spp.*, CP= Calificación de planta, RG= Rendimiento de grano, %H= Porcentaje de humedad.

Las interacciones de los datos analizados fueron estadísticamente significativas, línea x ambiente (AxL) presentó diferencias para las variables floración masculina y femenina, acame de raíz, plantas con daño por *fusarium spp.*, calificación de planta, rendimiento de grano y porcentaje de humedad; la interacción probador x ambiente (AxP) mostró diferencias para todas las variables, y como puede apreciarse ambiente x línea x probador (AxLxP) sólo muestra significancia para cinco variables: plantas con daño por *fusarium spp.*, rendimiento de grano, acame de raíz, días a floración femenina y porcentaje de humedad.

Esto revela que los ambientes afectaron diferencialmente la expresión de líneas, probadores y sus respectivas cruzas, por lo que hubo cambios en cuanto a su desempeño. Vargas *et al*, (2001) mencionan que la respuesta diferencial de genotipos a cambios en el ambiente es una interacción genotipo x ambiente (GxE por sus siglas en ingles), por su parte Eddon y Gauch (2002) mencionan que la interacción GE es problemática para

agrónomos y mejoradores debido a que las medias de los genotipos (promedio de ambientes) no son confiables para la predicción del desempeño de un genotipo, y que los genotipos deben ser dirigidos a localidades individuales para maximizar el desempeño.

Las decisiones dentro de un programa de mejoramiento, no sólo están regidas por las diferencias que puedan detectarse dentro de sus materiales genéticos, sino también por la clasificación que pueda hacerse de los mismos para facilitar su uso dentro del programa. Por este motivo se realizó el siguiente análisis.

### **Patrones de respuesta de probadores con atención a efectos de ACE mediante del modelo AMMI**

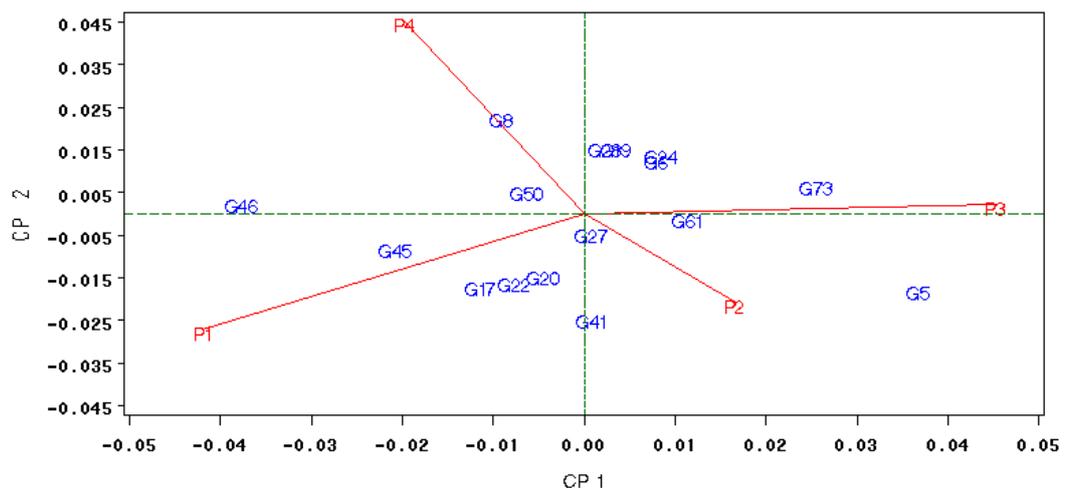
La formación de grupos heteróticos dentro de un programa de mejoramiento, a partir del comportamiento de probadores, es un proceso de importancia relevante ya que permite el desarrollo eficiente de nuevos híbridos que puedan ser liberados al mercado; debido a esto se realiza la búsqueda e identificación de nuevos patrones heteróticos atendiendo a los objetivos particulares de cada programa de mejoramiento.

El biplot generado para la exploración de la interacción de línea por probador (Figura 4.1) explicó el 78 % de la variación total de los datos; en un biplot como mencionan Narro *et al.* (2003) el coseno del ángulo entre los vectores de dos probadores (o líneas) es un aproximado de la correlación entre dos probadores (o líneas). Un ángulo de cero indica una correlación de

+ 1, un ángulo de 90° (o -90°) una correlación de cero y un ángulo de 180° una correlación de -1.

El Gráfico (Figura 4.1) muestra que los probadores P2 y P3 interaccionan de forma cruzada con los probadores P4 y P1 y forman dos grupos contrastantes; es importante destacar que los probadores P3 y P1 tienen una correlación negativa muy cercana a uno, al igual que los probadores P4 y P2, por lo que puede decirse que su base genética es completamente diferente.

**Figura 4.1. Biplot AMMI línea por probador construido con valores de ACE de rendimiento de 16 líneas cruzadas con cuatro probadores**



G = Línea, P = Probadores: P1 = PE-212-1-2-A, P2 = CS1, P3 = CS2, P4 = CS8 x ML.

De estos dos grupos de probadores se ha elegido al 1 y 3 como los más contrastantes por la forma en que influyen en las líneas, y con la respuesta de ACE que presentan las líneas con cada uno de ellos proceder a integrar a las líneas dentro de grupos heteróticos. Estos resultados concuerdan con los reportado por Sabaghnia *et al.* (2010) quienes analizaron parámetros genéticos en colza mediante el modelo AMMI y sus

biplots y encontraron dos patrones heteróticos para producción de aceite y seis cruzas entre grupos.

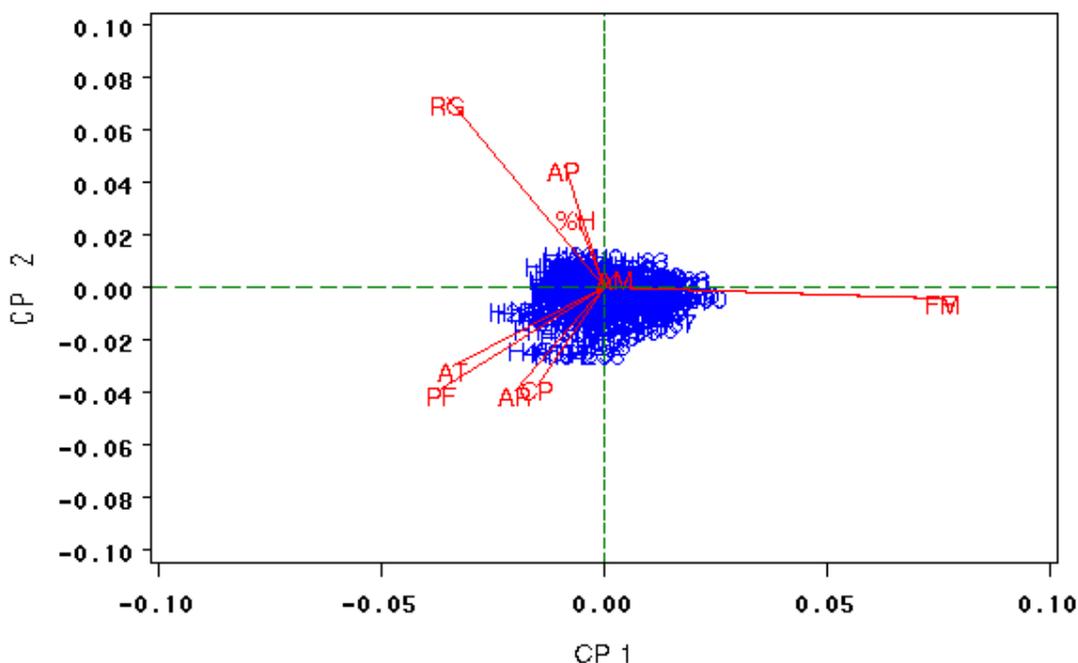
### **Detección de agrupamientos entre variables agronómicas correlacionadas mediante el modelo AMMI y su gráfico biplot**

De todas las líneas que se generan dentro de un programa de mejoramiento se busca sólo aquellas que sean sobresalientes en cuanto a sus atributos, debido a que la selección en base a todos ellos es difícil es necesario determinar sólo los más representativos.

Para la elección eficiente de las variables adecuadas en la construcción de un índice de selección se realizó un estudio de la asociación entre variables, explorando la agrupación del biplot generado por el modelo AMMI, donde los dos componentes principales de la interacción genotipo por variable explicaron el 56% del total de la variación de los datos, lo que indica que las relaciones entre las variables son complejas.

En el Gráfico (Figura 4.2) se visualizan las asociaciones entre las variables, y estas se encuentran divididas en tres grupos ubicados en diferentes sectores. Por lo cual es factible seleccionar una sola variable representativa de cada grupo para la construcción de un índice de selección efectivo que permita predecir el efecto de las variables con las cuales la variable representativa esta correlacionada y que no se consideran en la construcción del índice.

**Figura4.2. Biplot AMMI híbrido por variable agronómica construido con valores estandarizados estimados en 282 híbridos.**



FM=Días a floración masculina, FF= Días a floración femenina, AP= altura de planta, AM= Altura de mazorca, AR= Acame de raíz, AT=Acame de tallo, PF=Plantas con daño por *fusarium spp.*, CP= Calificación de planta, RG=Rendimiento de grano, %H=Porcentaje de humedad.

Dentro del primer grupo se encuentran las variables altura de mazorca, y días a floración masculina y femenina, de las cuales días a floración masculina y femenina presentan una correlación de 1; en este caso se dio prioridad a días a floración femenina sobre la masculina como variable representativa a elegir.

Dentro de un segundo grupo se encuentran las variables calificación de planta, plantas con daño por *fusarium spp.*, y acame de raíz y tallo, dentro de este grupo presentan una correlación alta las variables acame de raíz con calificación de planta, y plantas con daño por *fusarium spp.*, con acame de tallo, de este grupo de características se eligió calificación de planta, ya que el valor de esta característica toma en cuenta a las variables dentro su grupo.

En el tercer grupo se encuentran las variables rendimiento de grano, humedad y altura de planta, de entre las que se eligió rendimiento de grano por ser una característica de gran importancia dentro del programa.

Las asociaciones que muestra el gráfico (Figura 4.2) son prácticamente las mismas que resultaron de un análisis de correlación (Apéndice A.4) que se efectuó a la par que el análisis AMMI, las variaciones encontradas pueden deberse a que los dos componentes principales del modelo AMMI no explican el 100% de la variación de las características analizadas. Resultados similares a este fueron encontrados por Yan y Rajcan (2002) quienes reportan que las discrepancias se deben a que este tipo de modelos describen las interrelaciones entre todas las características en base al patrón general de los datos mientras que el coeficiente de correlación sólo describe la relación entre dos características.

### **Estimación de Índices de selección para líneas**

La selección de líneas por variable hace largo y costoso el proceso de mejoramiento, por lo cual para obtener una respuesta rápida es recomendable trabajar con una herramienta que permita el mejoramiento simultaneo de varias variables agronómicas, en este estudio se optó por el uso del índice de selección descrito por Barreto *et al*, (1991)

La construcción de los índices de selección para líneas fue hecho con los valores estimados de ACG de tres variables identificadas con el gráfico generado a partir del modelo AMMI, las cuales fueron: días a floración femenina, calificación de planta y rendimiento de grano. Los valores índices

fueron estimados a través de la metodología descrito por Barreto *et al.* (1991) para ambientes y repeticiones, y fueron modelados para su interpretación a través de un análisis de varianza.

Steel y Torrie (1985) mencionan que ciertas unidades experimentales si se tratan de modo parecido se comportan de forma diferente y en tales situaciones, cuando puede anticiparse el comportamiento de unidades individuales y clasificarlas pueden construirse diseños o planes de tal modo que la parte de la variabilidad atribuible a una fuente reconocida puede medirse y excluirse así del error experimental; al mismo tiempo las diferencias entre medias de tratamientos no contendrán contribución alguna atribuible a la fuente reconocida.

La selección de líneas se realizó para cada uno de los grupos de probadores detectados en base a los resultados obtenidos por el biplot del modelo AMMI (Gráfico 4.1) con los grupos de probadores que no interaccionan de forma opuesta y favorecen la identificación de líneas de comportamiento superior; ya que la selección en base al comportamiento de los cuatro probadores puede producir sesgos en los resultados.

#### **Análisis de varianza de índices de selección de las líneas para probadores P1 y P4**

El análisis de varianza de los valores índice (Cuadro 4.3) detectó diferencias significativas para todas las fuentes de variación, lo que indica la existencia de diferencias entre ambientes, repeticiones y líneas, por lo tanto dentro de líneas es posible seleccionar a las que presenten mejor índice; la

significancia de interacción de líneas con localidades (A x L) mostró que el comportamiento del índice de selección de las líneas fue influenciado por cambios en el ambiente.

**Cuadro 4. 3 Análisis de varianza de los valores del índice de selección construido con valores de ACG para líneas cruzadas con los probadores P1 y P4**

FV	GL	SC	PC	F-Valor	Pr > F
Ambiente (A)	2	69.1650067	34.5825034	7.82 **	0.0008
Repetición /A	3	118.037071	39.3456903	8.89 **	<.0001
Línea (L)	25	843.161834	33.7264733	7.62 **	<.0001
A x L	50	507.330844	10.1466169	2.29 **	0.0006
Error	75	331.814578	4.424194		
C.V.	18.43055				
Media	11.41245				

\*\* y \*, significancia al nivel de  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$  respectivamente; C. V.(%)=coeficiente de variación; F.V.= Fuente de variación, G.L.= Grados de libertad, SC = Suma de cuadrados, PC = porcentaje de contribución.

La selección de líneas fue bajo el criterio del valor obtenido de la diferencia entre la media y una desviación estándar, a partir de ese valor se seleccionaron cuatro líneas 45, 46, 24 y 2.

**Cuadro 4. 4 Medias del valor del índice de selección para líneas cruzadas con los probadores P1 y P4**

LINEA	MEDIA	LINEA	MEDIA
45	<b>6.0347667</b>	31	11.8218333
46	<b>6.95575</b>	69	11.9744
24	<b>8.1242333</b>	61	12.1246333
2	<b>8.3806</b>	6	12.2511667
19	9.16195	50	12.7514333
91	9.4534167	41	12.78485
28	10.0588333	3	12.7994
26	10.45295	73	12.8572333
20	11.0774333	30	12.89935
17	11.2359667	82	13.5375
8	11.4620833	25	14.1335167
4	11.46325	5	15.6453333
27	11.5702167	22	15.7115667
Media Índice	11.41245		
Desviación	2.37088146		
Diferencia	9.04156854		

## Análisis de varianza de índices de selección de las líneas para probadores P2 y P3

El análisis de varianza para los valores índice de las líneas que se cruzaron con los probadores P2 y P3 (Cuadro 4.5) mostró que todas las fuentes de variación excepto repeticiones, fueron significativamente diferentes, lo cual indica que las líneas y los ambientes son diferentes entre sí; la interacción entre líneas y localidades (A x L) indicó que las localidades influyeron en el comportamiento de las líneas.

**Cuadro 4. 5 Análisis de varianza de los valores del índice de selección construido con valores de ACG para líneas cruzadas con los probadores P2 y P3**

FV	GL	SC	PC	F-Valor	Pr > F
Ambiente (A)	2	189.406091	94.703045	11.17 **	<.0001
Repetición/A	3	29.581502	9.860501	1.16	0.3253
Línea (L)	63	1113.34147	17.672087	2.08 **	<.0001
A x L	126	1953.82386	15.506539	1.83 **	<.0001
Error	189	1602.77122	8.480271		
C.V.	24.53675				
Media	11.86828				

\*\* y \*, significancia al nivel de  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$  respectivamente; C. V.(%)=coeficiente de variación; F.V.= Fuente de variación, G.L.= Grados de libertad, SC = Suma de cuadrados, PC = porcentaje de contribución.

La selección se procedió al igual que con las líneas involucradas con los probadores P1 y P4, a través de la diferencia entre la media y dos desviaciones estándar debido al mayor número de líneas involucradas, a partir de ese valor las líneas que se seleccionaron fueron: 59, 52, 24, 55, 51, 76, 71, 79 y 88. El cálculo de los valores índice a través de localidades y repeticiones hizo posible modelar los valores para estadísticamente encontrar diferencias y realizar la selección.

**Cuadro 4. 6 Medias del valor del índice de selección para líneas cruzadas con los probadores 2 y 3**

LINEA	Media	LINEA	Media	LINEA	Media
59	<b>8.1879167</b>	28	11.3641	44	12.5236
52	<b>8.3462167</b>	21	11.3655	89	12.5686833
24	<b>8.4096</b>	63	11.3979167	46	12.5839333
55	<b>9.0167333</b>	32	11.46425	74	12.7216833
51	<b>9.4198833</b>	1	11.5166	5	12.8295167
76	<b>9.6536667</b>	16	11.5340333	73	12.93745
71	<b>9.9534</b>	48	11.5426	42	13.20345
79	<b>10.1097833</b>	45	11.6074667	60	13.2645333
88	<b>10.1434667</b>	84	11.6152	64	13.5747833
81	10.26865	8	11.64545	50	13.5853833
14	10.2736667	15	11.6513	90	13.8923167
69	10.42565	61	11.7023333	41	14.0579
72	10.4763167	62	11.7333333	27	14.1608333
17	10.5784833	57	11.8076	6	14.2476833
23	10.67195	85	11.86145	40	14.2594833
83	10.9803667	12	11.8683	80	14.42045
7	11.15565	75	11.8766333	33	14.8383333
20	11.1566667	11	12.01965	22	15.3344167
13	11.19295	54	12.02535	38	15.8919167
19	11.2792	49	12.0701833	70	16.1861
9	11.2882833	18	12.2336		
67	11.3232667	87	12.27285		
Media	11.86828				
Desviación	1.71620156				
Diferencia	10.1520784				

### **Afiliación de líneas.**

Una vez que las líneas fueron seleccionadas con base en su valor índice, es importante determinar en qué grupo deben ubicarse, para que el uso de ellas sea eficiente y pueda lograrse la formación rápida de híbridos dentro del programa.

Para este propósito se utilizó la aptitud combinatoria específica de la característica rendimiento de grano de las líneas apareadas con los grupos

de probadores contrastantes P2, P3 y P1, P4 identificados con el modelo AMMI y su biplot para la respuesta de la interacción entre probadores.

La forma de afiliación está dada de la siguiente forma: aquellas líneas que combinen bien con el probador P3 y P2 pertenecen al grupo formado por el probador P1 y P4. Con base al análisis de los valores de ACE (Cuadro 4.7) las líneas 51, 52, 55, 59, 71, 76, 79 y 88 presentan efectos favorables ya sea con el probador P2 o con el probador P3, por lo que teóricamente deben pertenecer al grupo de probadores contrastantes (P1 y P4); por otra parte las líneas 2, 45 y 46 muestran efectos favorables con los probadores P1 y P4 por lo que su afiliación debe ser al grupo contrario contrastante.

Podemos observar que la línea 24 fue apareada con ambos grupos, presentando efectos positivos con un probador de ambos grupos, por lo que podemos decir que su base genética es sumamente amplia. Debido a esto no fue afiliada dentro de ningún grupo heterótico ya que al incluirla dentro de alguno de ellos se puede romper la complementariedad, pero al presentar buenos atributos pueden dársele otros usos dentro del programa como el ser progenitora de nuevos híbridos.

**Cuadro 4. 7 Valores de la media y de ACE de líneas seleccionadas a través de los grupos de probadores P2, P3 y P1, P4.**

Hibrido	Línea	Probador	Media	ACE	RG	Hibrido	Línea	Probador	Media	ACE	RG
86	24	3	14.06	0.87277		5	2	1	13.5357	0.43924	
161	51	2	14.2026	0.45436		88	24	4	13.2926	0.67184	
163	52	2	14.8643	0.31294		145	45	1	12.665	0.6449	
171	55	3	13.7797	0.17696		150	46	4	12.7838	0.24482	
180	59	3	14.5206	0.93312							
212	71	2	13.1753	0.08996							
226	76	3	14.4963	0.89874							
229	79	2	13.4699	0.07358							
248	88	2	14.6394	0.81396							

### **Estimación de índices de selección para híbridos.**

La generación de híbridos exitosos es el objetivo de un programa de mejoramiento dedicado a la explotación de efectos de ACE; al ser el resultado final y lo que se ofrecerá al mercado se deben elegir híbridos que cumplan con los criterios exigidos por el agricultor y que posean atributos sobresalientes.

Los índices de selección para híbridos fueron construidos a partir de las tres variables representativas identificadas con el gráfico generado a partir del modelo AMMI; estos valores índice al igual que en líneas fueron estimados a través de la metodología descrita por Barreto *et al.* (1991) y también fueron estimados por ambiente y repetición para poder ser modelados, analizados y realizar una mejor interpretación de los datos.

El análisis muestra diferencias significativas en todas las fuentes de variación (Cuadro 4.8), lo cual como se ha mencionado anteriormente indica que existen diferencias en los ambientes, en repeticiones dentro de ambientes y en híbridos (HIB); en lo referente a híbridos indica que al menos uno es diferente y superior a los demás y la interacción entre híbridos y

localidades indica que el desempeño de los híbridos fue afectado por las localidades.

**Cuadro 4. 8 Análisis de varianza de valores del índice de selección construido con valores fenotípicos para híbridos experimentales evaluados durante 2011.**

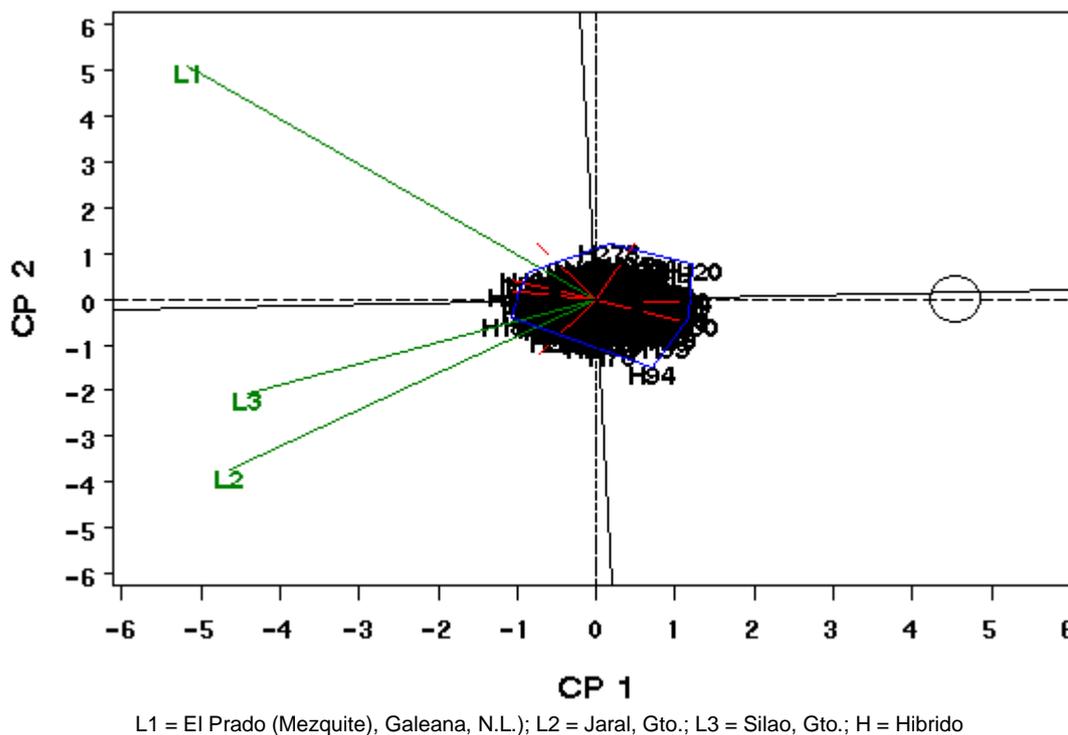
FV	G.L	SC	PC	F-Valor	Pr > F
Ambiente (A)	2	144.562925	72.281463	9.31 **	<.0001
Repetición/A	3	169.960101	56.653367	7.3 **	<.0001
Híbridos (HIB)	281	9191.5553	32.710161	4.21 **	<.0001
A x HIB	562	6417.11277	11.41835	1.47 **	<.0001
Error	843	6542.30016	7.76074		
C.V.	20,07731				
Media	13,87541				

### **Selección de híbridos mediante el modelo SREG**

La selección de los híbridos se realizó en base al valor índice obtenido y en su estabilidad a través de tres localidades (Figuras 4.3 y 4.4). La selección al aplicar el índice de selección de Barreto *et al.* (1991) es en base a los valores más pequeños, por lo que las localidades dentro del gráfico biplot fueron ubicadas en los cuadrantes negativos.

Las localidades forman dos mega-ambientes ubicados en sectores diferentes (Figura 4.3), el primero está integrado por las localidades L2 (Jaral, Gto.) y L3 (Silao, Gto.) y el segundo por la localidad L1 (El Prado, Galeana, N.L.). Al no poder visualizarse la totalidad de los híbridos en el gráfico se realizó una ampliación del mismo (figura 4.4).

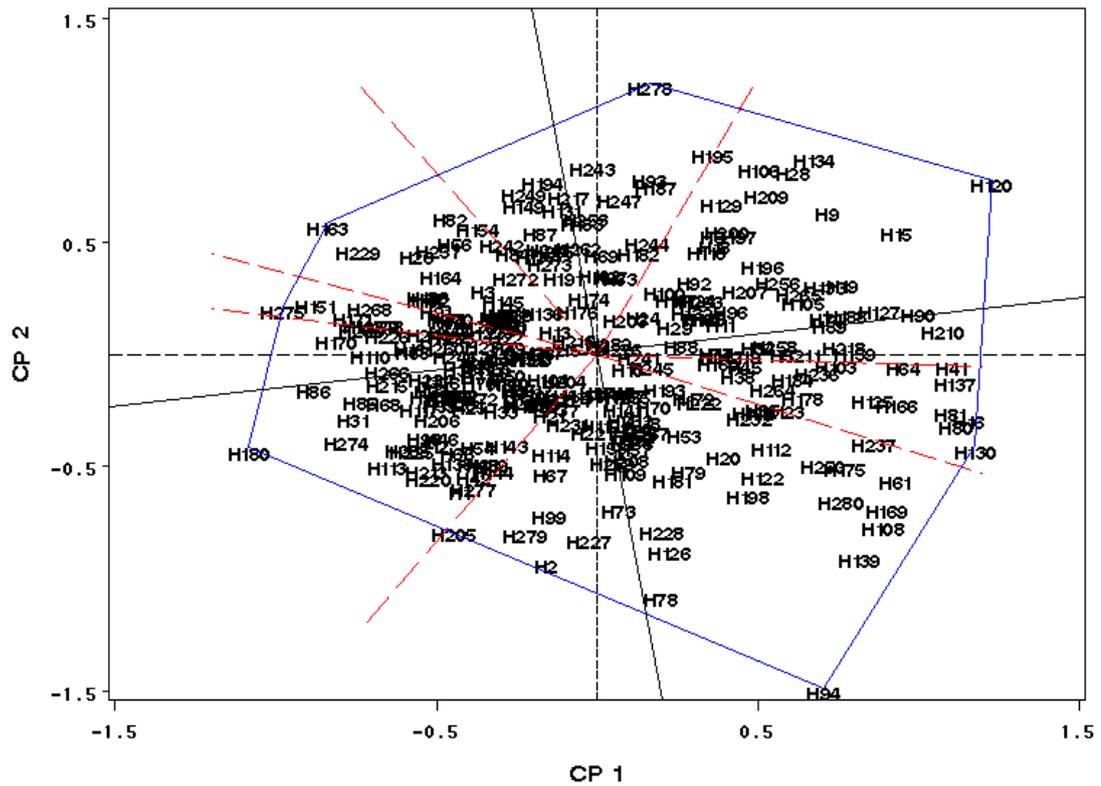
**Figura 4.3. Biplot GGE híbrido por localidad basado en valores de índice de selección de 282 híbridos estimados por localidad.**



Como mencionan (Yan *et al.*, 2000) los genotipos en el vértice o esquina, son los de mayor respuesta y pueden ser fácilmente identificados. Estos son cualquiera los mejores o los más pobres genotipos en algunas o todas las localidades. Como ya se explicó anteriormente al trabajar con valores índice, interesan aquellos híbridos que presenten menor valor, y que en este caso para las localidades L2 y L3 es el híbrido H180 y para la localidad L1 el híbrido H163.

Estos no son los únicos híbridos con bajo valor índice, en un sector pequeño en medio de los sectores donde se encuentran las localidades se encuentra el híbrido H275 y H151, que aunque no se encuentran ubicado dentro de ninguna localidad tiene un bajo valor índice. Otros híbridos en igual caso y que se encuentran en el sector de las localidades L2 y L3 son: H170, H110 y H86.

Figura 4.4. Ampliación del biplot GGE correspondiente a la figura 4.3.



Un ambiente promedio virtual (AEC por sus siglas en inglés) es definido como un ambiente el cual es el promedio de los valores PC1 y PC2, a través de todos los ambientes, que muestra la media contra la estabilidad y permite ordenar a los genotipos en base a su desempeño. La abscisa del AEC representa la variación debido a G y la ordinada del AEC representa la variación debido a GE, si no hay GE todos los genotipos podrían caer en la abscisa del AEC, la cual podría ser paralela al eje PC1, también podría explicar el 100% de la variación total de los datos del ambiente (Yan *et al.*, 2002). Con base en lo anterior, los híbridos más estables son: H86, H215 y H266.

## Exploración del comportamiento de probadores

Dentro de un programa de mejoramiento no sólo es necesaria la elección y afiliación de líneas dentro de grupos heterotícos, también es necesario determinar dentro de las líneas y cruzas simples elegidas como probadores aquellas que como progenitores transmitan atributos deseables a sus descendientes, y aquellas que permitan seleccionar líneas sin enmascaramiento de su potencial.

La exploración del comportamiento de probadores se realizó con la finalidad de determinar características propias de cada probador en base a sus medias, al cuadrado medio de su análisis de varianza, y al valor de ACG (Cuadro 4.9), encontrándose que en cuanto a la media para cada variable los probadores P2 y P3 presentaron las medias más favorables para días a floración masculina y femenina, los probadores P5 y P6 para altura de planta y mazorca, el probador P5 seguido por el probador P2 y P6 en acame de raíz y tallo, para plantas con daño por *fusarium spp.*, el mejor fue el probador P2 seguido por el P6, para calificación de planta el P2, P5 y P6.

En cuanto a la media de rendimiento de grano los mejores probadores fueron el P2, P5 y P6, y para porcentaje de humedad el P2, P4 y P5 respectivamente. Se observó que en general como progenitores de nuevos híbridos los probadores P2 y P6 realizarían un buen papel al transmitir buenos atributos a sus descendientes.

**Cuadro 4. 9 Medias, valor de ACG y cuadrados medios por variable de los seis probadores empleados para la selección de líneas.**

PROBADOR	ESTIMADO	FM	FF	AP	AM	AR
PE-212-1-2	Media	79.98519	81.08148	231.9889	129.7296	16.68373
(P1)	ACG	0.6278	0.67255	-7.0672 **	1.2073	11.533
	C.M.	13.56237 **	14.86764 **	389.3685 **	525.9786 **	470.74711 **
CS1	Media	78.6578	79.63121	241.9965	123.8032	3.051687
(P2)	ACG	-0.69959 **	-0.77773 **	2.9403	-4.7191 **	-2.0991 **
	C.M.	9.4375 **	9.1081 **	400.14 *	384.098 **	40.137876
CS2	Media	78.25901	79.12838	236.2455	126.9955	2.73235
(P3)	ACG	-1.09838 **	-1.28056 **	-2.8106 **	-1.5268 **	-2.4184 **
	C.M.	6.73999 **	8.82857 **	385.2778 **	463.4389 **	46.339092 **
CS8 x ML	Media	80.9386	82.3655	245.2807	139.7661	3.698287
(P4)	ACG	1.58121	1.95656	6.2246	10.2437	-1.4525 **
	C.M.	10.40589 **	12.56789 **	610.5169 **	622.6526 **	64.574072 **
LB	Media	80.83333	81.61111	236.4	122.3556	2.010447
(P5)	ACG	1.47595	1.20218	-2.6561 **	-6.1668 **	-3.1403 **
	C.M.	3.60158 *	4.2934 *	336.99813 **	105.34034	15.1491446
LB2	Media	80.44444	81.75	228.1667	120.8333	3.015135
(P6)	ACG	1.08706	1.34107	-10.8895 **	-7.689 **	-2.1356 **
	C.M.	9.999659 **	14.510188 **	413.85985 *	278.83683	23.4904486

\*\* y \*, significancia al nivel de  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$  respectivamente; C. V.(%)=coeficiente de variación; F.V.= Fuente de variación, G.L.= Grados de libertad, FM= Floración masculina, FF= Floración femenina, AP= Altura de planta, AM= Altura de mazorca, AR= Acame de raíz.

Para la discriminación de líneas la elección de un probador fue en base a sus efectos de ACG los cuales deben ser estadísticamente no diferentes de cero para que no enmascaren el potencial de las líneas y al cuadrado medio del análisis de varianza por probador.

Los probadores cuyo efecto de ACG fue estadísticamente igual a cero y detectaron diferencias dentro de sus híbridos para las variables incluidas son el probador P1 para días a floración masculina y femenina, altura de mazorca, acame de raíz, plantas con daño por *fusarium spp.*, calificación de planta y porcentaje de humedad, seguido del probador P3 para las variables acame de tallo, rendimiento de grano y al igual que el probador P1 para plantas con daño por *fusarium spp.*, calificación de planta y porcentaje de humedad, consecutivamente el probador P4 para la variable altura de planta

y al igual que el probador P1 para las variables días a floración femenina y masculina, y altura de mazorca; para la variable rendimiento de grano el mejor probador fue el P2 y P3, el probador P2 también mostro discriminación para la variable altura de planta. No se encontró un probador para la discriminación de todas las variables sin embargo el probador P1 es el que más se acerca a lo deseado.

#### Continuación del Cuadro 4.9

**Cuadro 4. 9 Medias, valor de ACG y cuadrados medios por variable de los seis probadores empleados para la selección de líneas.**

PROBADO R	ESTIMADO	AT	PF	CP	RG	%H
PE-212-1-2	Media	2.694205	2.832649	3.222222	11.18783	14.73185
(P1)	ACG	1.2264	0.53523	0.20447	-1.0566	0.17006
	C.M.	28.370113	7.9008354	0.5730275	13.867075	12.35238
				8	3	4
CS1	Media	1.162102	1.894842	2.85461	13.08047	14.33089
(P2)	ACG	-0.3057	-0.40258	-0.16314	0.83604	-0.23091
	C.M.	2.0998883	3.4351137	0.4300938	5.354528	7.03312
				3		
CS2	Media	1.459076	2.700605	3.04955	12.31944	14.83664
(P3)	ACG	-0.00873	0.40318	0.03179	0.07501	0.27485
	C.M.	2.292159	6.9557443	0.7979079	7.801457	5.497574
				1		
CS8 x ML	Media	1.178485	2.187804	3.233918	11.39788	14.39269
(P4)	ACG	-0.28932	-0.10962	0.21616	-0.84655	-0.1691
	C.M.	6.3565348	2.8971903	0.5609658	8.621057	8.408928
				1		
LB	Media	1.219291	2.023058	2.655556	12.95351	14.26889
(P5)	ACG	-0.24851	-0.27436	-0.3622	0.70908	-0.2929
	C.M.	1.0210514	2.0670912	0.3642541	4.2859168	7.088517
			7	7		
LB2	Media	0.536655	1.34497	2.5	12.41532	15.85278
(P6)	ACG	-0.93115	-0.95245	-0.51775	0.17088	1.29099
	C.M.	0.4363593	0.6046852	0.2157547	11.522698	3.820747
		4	6	5	7	6

\*\* y \*, significancia al nivel de  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$  respectivamente; C. V.(%)=coeficiente de variación; F.V.= Fuente de variación, G.L.= Grados de libertad, AT= Acame de tallo, PF= Plantas con daño por *fusarium spp.*, CP= Calificación de planta, RG= Rendimiento de grano, %H= Porcentaje de humedad.

## **Correlaciones entre el índice de selección de Barreto contra el índice de selección de Elston y de ambos índices con calificación de planta**

La elección de un índice que permita la selección de líneas e híbridos de una manera fácil y precisa es importante en un programa de mejoramiento, pues además de ser sencillo, permitirá el ahorro de tiempo en el análisis de los datos.

Para determinar la asociación entre la metodología descrita por Barreto *et al.* (1991) y la metodología descrita por Elston y si su aplicación es indistinta al lograr el mismo orden dentro de los híbridos, se realizó el cálculo de ambos índices con ocho variables y con las tres variables representativas detectadas por el modelo AMMI.

La correlación entre sus valores obtenidos con ocho variables y tres variables representativas indica que existe asociación estadísticamente significativa, pero que esta es mayor cuando ambos índices son calculados con las tres variables representativas, mostrando que ambos índices realizan el mismo ordenamiento de híbridos y que su uso es indistinto al aplicarse las variables representativas (Cuadro 4.10), por lo tanto podemos argumentar que la elección de las características para la construcción de un índice es importante en la selección. Cuando se realizó la comparación dentro de cada índice para los valores obtenidos con ocho variables y tres variables representativas respectivamente, se identificó mayor asociación entre el ordenamiento realizado por el índice de Barreto *et al.*, (1991).

**Cuadro 4.10 Correlación entre el índice de Elston y el Índice de Barreto; y de ambos índices entre sí mismos con ocho y tres variables**

<b>Correlación</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Valor P</b>
Elston 8 variables vs Barreto 8 variables	0.79683	<.0001
Elston 3 variables vs Barreto 3 variables	0.95364	<.0001
Barreto 8 variables vs Barreto 3 variables	0.78729	<.0001
Elston 8 variables vs Elston 3 variables	0.67618	<.0001

La selección visual realizada en campo está basada en la experiencia y la habilidad de cada investigador, y su práctica es común pues permite la observación de atributos de forma de la planta tales como disposición de las hojas, color, cobertura de la mazorca por el totomoxtle entre otras que son deseables en un programa de mejoramiento, por lo tanto aunque los índices de selección son una herramienta útil deben aplicarse a la par que el trabajo de campo.

Para conocer cual índice se acerca más al trabajo realizado en campo se realizó la correlación de ambos índices y calificación de planta (Cuadro 4.11), donde se observa que el índice de Barreto *et al*, (1991) presenta una mayor similitud con el ordenamiento de híbridos realizado por calificación de planta que el índice de Elston.

**Cuadro 4. 11 Correlación entre el índice de Elston y el índice de Barreto con calificación de planta.**

<b>Correlación</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Valor P</b>
Barreto 8 variables y Calificación de planta	0.61168	<.0001
Elston 8 variables y Calificación de planta	0.54128	<.0001

## **V. CONCLUSIONES**

La aplicación del modelo AMMI para el estudio de la interacción de línea por probador con base en efectos de ACE permitió detectar dos grupos de probadores P4, P1 y P2, P3; y dos probadores contrastantes útiles para la afiliación de líneas dentro de grupos heteróticos el P1 y P3.

El estudio de la agrupación entre las variables agronómicas mediante el modelo AMMI, identificó tres grupos de variables correlacionadas dentro de los cuales se eligieron las más representativas: días a floración femenina, calificación de planta y rendimiento de grano, y con ellas se construyó el índice de selección.

La selección de líneas bajo el criterio de índices de selección construido con valores de ACG permitió seleccionar doce líneas, tres dentro del grupo de probadores P1 y P4 y nueve para el grupo de probadores P2 y P3; y su consecuente afiliación dentro de estos mismos grupos.

La selección de híbridos con base en la estabilidad de un favorable índice de selección bajo el modelo SREG hizo posible la detección de dos mega-ambientes el primero integrado por las localidades L2 (Jaral, Gto.) y L3 (Silao, Gto.) y el segundo por la localidad L1 (El Prado, Galeana, N.L.) también identifico a los híbridos más sobresalientes, para las localidades L2 y L3 el híbrido H180 y para la localidad L1 el híbrido H163. El uso del

ambiente promedio virtual permitió la identificación de los híbridos más estables que son: H86, H215 y H266.

Los probadores identificados como progenitores potenciales de nuevos híbridos con base en el promedio favorable por variable fueron el P2 y P6, y como el de mayor poder de discriminación con base en los valores de los cuadrados medios por probador y efectos de ACG fue el probador P1.

La comparación entre las metodologías de Barreto y Elston al construir el índice de selección con las variables representativas mostró una correlación positiva y estadísticamente significativa de (0.95).

## VI. Literatura citada

- Baker R. J. 1986. Recommendations for using selection indices in plant breeding. In: Selection indices in plant breeding. Boca Raton, Florida, CRC Press, Inc.
- Barreto H. J., J. A. Bolaños y H. S. Cordova. 1991. Programa índices de selección. Guía para la operación del software. CIMMYT. México, D. F. 27 p.
- Burgueño J., J. Crossa and M. Vargas. 2001. Sas programs for graphing GE and GGE biplots. Available in: <http://intranet.cimmyt.org/es/programas-y-unidades/unidades-y-laboratorios/laboratorio-de-informatica-aplicada-a-cultivos/gruposunidades-disciplinarias/unidad-de-biometria-y-estadistica>
- Camdzija Z., M. Filipovic, J. Vancetovic, S. Prodanovic, S. Bozinovic, J. Pavlov, A. Popovic. 2012. The evaluation of combining abilities for grain yield of ZP maize inbred lines using the line x tester analysis. Third International Scientific Symposium Agrosym Jahorina 2012.
- Ceron J. J., J. Crossa, J. Sahagun, F. Castillo, and A. Santacruz. 2006. A selection index method based on eigenanalysis. Crop Sci. 46:1711-1721.
- Cotterill P. P. 1985. On index selection II. Simple indices which require no genetic parameters or special expertise to construct. Silvae Genetica 34, 2-3 p.64-69. Available in: [http://www.bfafh.de/inst2/sg-pdf/34\\_2-3\\_64.pdf](http://www.bfafh.de/inst2/sg-pdf/34_2-3_64.pdf)
- Ebdon J. S., and H. G. Gauch. 2002. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turfgrass performance trials: II. Cultivar recommendations. Crop Sci. 42:497-506.
- Gabriel K. R. 1971. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. Biometrika 58: 453-467.
- Gerdes J. T., and W. F. Tracy. 1993. Pedigree diversity within the Lancaster Surecrop heterotic group of maize. Crop Sci., 33:2:334-337.
- Guillen P., L. G. de la Cruz, G. Castañón., R. Osorio, N. P. Brito, A. Lozano, U. López. 2009. Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10(2009):101-107.

- Hefny M. 2010. Genetic control of flowering traits yield and its components in maize (*Zea mays* L.) at different sowing dates. *Asian J. Crop Sci.*, 2(4):236-249.
- Ibañez M. A., M. M. Cavanagh, N. C. Bonamico, M. A. Di Renzo. 2006. Análisis gráfico mediante biplot del comportamiento de híbridos de maíz. *RIA*, 35(3):83-93.
- Iqbal A. M., F. A. Nehui, S. A. Wani, R. Qadir and Z. A. Dar. 2007. Combining ability analysis for yield related traits in maize (*Zea mays* L.). *Int. J. Plant Breed. Genet.*, 1(2):101-105.
- Kanaragasu S., G. Nallathambi and K. N. Ganesan. 2010. Combining ability analysis for yield and its component traits in maize (*Zea mays* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, 1(4):915-920(July 2010).
- Melchinger A. E., and R. K. Gumber. 1998. Overview of heterosis and heterotic groups in agronomic crops. Pp.29-44. In: Lamkey K. R., J. E. Staub (Eds). *Concepts and breeding of heterosis in crop plants*. CSSA, Madison, WI.
- Meseka S., and J. Ishaq. 2012. Combining ability analysis among Sudanese and IITA maize germplasm at Gezira Research Station. *Journal of Applied Biosciences* 57:4198-4207.
- Milligan S. B, M. Balzarini, and W.H. White. 2003. Broad-sense heritabilities, genetic correlations, and selection indices for sugarcane borer resistance and their relation to yield loss. *Crop Sci.*, 43:1729-1735.
- Morata M. M., D. A. Presello, M. P. González y E. Frutos. 2006. Aptitud combinatoria para rendimiento entre líneas de maíz derivadas de nuevas fuentes de resistencia al mal de rio cuarto. *Revista de la Facultad de Agronomía, La plata* 106(1).
- Narro L., S. Pandey, J. Crossa, C. De Leon and F. Salazar. 2003. Using line x tester interaction for the formation of yellow maize synthetics tolerant to acid soils. *Crop Sci.* 43:1718-1728.
- Naveed M., M. Nadeem and N. Islam. 2007. AMMI analysis of some upland cotton genotypes for yield stability in different milieus. *World J. Agric. Sci.*, 3(1):39-44, 2007.
- Pavan R., H. C. Lohithaswa, M. C. Wali, G. Prakash and B. G. Shekara. 2011. Genetic analysis of yield and its component traits in maize (*Zea mays* L.). *Plant Archives* Vol.11 No.2 pp.831-835.
- Ramírez J. L., J. Ron, J. Sánchez, A. Carcia, J. Maya. 1998. Aptitud combinatoria general y correlaciones fenotípicas entre líneas y mestizos de maíz. *Agronomía mesoamericana* 9(2):69 -76.

- Reif J. C., A. R. Hallauer, A. E. Melchinger. 2005. Heterosis and heterotic patterns in maize. *Maydica* 50(2005):215-223.
- Sabaghnia N., H. Dehghani, B. Alizadeh, and M. Mohghaddam. 2010. Genetic analysis of oil yield, seed yield and yield components in rapeseed using additive main effects and multiplicative interaction biplots. *Agron. J.*102:1361-1368(2010).
- Sakiroğlu M., and E. C. Brummer. 2007. Little heterosis between alfalfa populations derived from the Midwestern and Southwestern united. *Crop Sci.* 47:6:2364-2371.
- Samonte S. O. P. B., L. T. Wilson, A. M. McClung and J. C. Medley. 2005. Targeting cultivars onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analyses. *Crop Sci.*, 45: 2414-2424.
- Sharma R. C., and E. Duveiller. 2003. Selection index for improving helminthosporium leaf blight resistance, maturity and kernel weight in spring wheat. *Crop Sci.*, 43:2031-2036.
- Sierra M., F. Márquez, R. Valvidia, O. Cano, y F. A. Rodríguez. 2000. Aptitud combinatoria general y específica de líneas tropicales de maíz usando probadores. *Agronomía Mesoamericana* 11(1):103-112.
- Smith H. F. 1936. A discriminant function for plant selection. *Ann. Eugenics*, 7:240-250. Available in: [http://eprints.icrisat.ac.in/10179/1/AHG\\_7\\_3\\_240-250\\_1936.pdf](http://eprints.icrisat.ac.in/10179/1/AHG_7_3_240-250_1936.pdf)
- Sofi P., and A. G. Rather. 2006. Genetic analysis of yield traits in local and CIMMYT inbred line crosses using line x tester analysis in maize (*Zea mays* L.). *Asian J. Plant Sci.*, 5(6):1039-1042.
- Steel R. G. D., and J. H. Torrie. 1985. Analisis de la varianza II: Clasificaciones multiples en: *Bioestadística: principios y procedimientos*. México D. F. McGraw-Hill., p 188.
- Trifunovic S., H. Cordova, J. Crossa, S. Pandey. 2003. Head-to-head and stability analysis of maize (*Zea mays* L.) inbred lines. *Maydica* 48(2003):263-269.
- Vargas M. J., and J. Crossa. 2000. The AMMI analysis and the graph of biplot in SAS. Available in: <http://www.cimmyt.org/biometrics>.
- Vargas M., J. Crossa, F. van Eeuwijk, K. D. Sayre, and M. P. Reynolds. 2001. Interpreting treatment x environment interaction in agronomy trials. *Agron. J.*93:949-960.
- Xia X. C., J. C. Reif, A. E. Melchinger, M. Frisch, D. A. Hoisington, D. Beck, K. Pixley. 2005. Genetic diversity among CIMMYT maize inbred lines investigated with SSR markers. *Crop Sci.* 45:6:2573-2582.

- Yan W., and J. Frégeau-Reid. 2008. Breeding line selection based on multiple traits. *Crop Sci.* 48:417-423.
- Yan W., and L. A. Hunt. 2002. Biplot analysis of diallel data. *Crop Sci.* 42:21-30.
- Yan W., L. A. Hunt, Q. Sheng, and Z. Szlavncs. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci.* 40:597-605.
- Yan W., and I. Rajcan. 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Sci.* 42:11-20.
- Yan W., and N. A. Tinker. 2005. An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting and exploring genotype x environment interaction. *Crop Sci.* 45:1004-1016.

## VII. APENDICE

### Metas e intensidades para líneas.

**Cuadro A. 1 Metas e intensidades utilizadas por repetición para el cálculo de índices de selección de los valores de ACG de líneas cruzadas con probadores P1 y P4 para 3 variables fenotípicas.**

Variable	Intensidad	Metas					
		L1R1	L1R2	L2R1	L2R2	L3R1	L3R2
FF	10	-2.40	-1.61	-2.44	-2.85	-1.40	-2.05
CP	9	-2.12	-1.53	-1.95	-1.98	-2.44	-1.75
RG	9	2.01	1.90	1.79	1.98	2.04	1.61

**Cuadro A. 2 Metas e intensidades utilizadas por repetición para el cálculo de índices de selección de los valores de ACG de líneas cruzadas con probadores P2 y P3 para 3 variables fenotípicas.**

Variable	Intensidad	Metas					
		L1R1	L1R2	L2R1	L2R2	L3R1	L3R2
FF	10	-1.83	-1.76	-2.19	-3.00	-1.88	-2.32
CP	9	-1.79	-2.21	-2.07	-2.05	-1.38	-1.73
RG	9	2.69	2.56	2.28	1.78	2.42	1.46

### Metas e intensidades para híbridos

**Cuadro A. 3 Metas e intensidades utilizadas por repetición para el cálculo de índices de selección de híbridos para 3 variables fenotípicas.**

Variable	Intensidad	Metas					
		L1R1	L1R2	L2R1	L2R2	L3R1	L3R2
FF	10	-2.41	-1.83	-3.00	-2.55	-1.97	-2.03
CP	9	-2.43	-2.50	-2.32	-2.55	-3.00	-2.95
RG	9	2.79	2.71	2.35	2.50	2.76	2.46

**Cuadro A. 4 Valores r del análisis de correlación para diez variables fenotípicas**

Variable	FM Días	FF Días	AP cm	AM cm	AR %	AT %	PF %	CP Escala	RG (t ha <sup>-1</sup> )	%H %
FM	1	0.90524 ** <.0001	0.11801 * 0.0443	0.31837 ** <.0001	0.14489 * 0.0134	-0.00963 0.87	-0.09801 0.0952	0.16129 ** 0.0058	-0.28182 ** <.0001	0.1524 ** 0.0092
FF	0.90524 ** <.0001	1	0.15135 ** 0.0097	0.31939 ** <.0001	0.15136 ** 0.0097	-0.02009 0.7329	-0.09893 0.0921	0.16619 ** 0.0045	-0.29739 ** <.0001	0.11139 0.0577
AP	0.11801 * 0.0443	0.15135 ** 0.0097	1	0.53755 ** <.0001	-0.20631 ** 0.0004	-0.01843 0.7543	-0.07715 0.1894	0.18047 ** 0.002	0.22447 ** 0.0001	-0.00655 0.9115
AM	0.31837 ** <.0001	0.31939 ** <.0001	0.53755 ** <.0001	1	0.14381 * 0.0141	0.16213 ** 0.0056	0.09714 0.0981	0.45719 ** <.0001	-0.15248 ** 0.0092	0.06384 0.2777
AR	0.14489 * 0.0134	0.15136 ** 0.0097	-0.20631 ** 0.0004	0.14381 * 0.0141	1	0.55649 ** <.0001	0.40923 ** <.0001	0.41736 ** <.0001	-0.3348 ** <.0001	0.066 0.2618
AT	-0.00963 0.87	-0.02009 0.7329	-0.01843 0.7543	0.16213 0.0056	0.55649 ** <.0001	1	0.49212 ** <.0001	0.41054 ** <.0001	-0.22425 ** 0.0001	0.01195 0.8391
PF	-0.09801 0.0952	-0.09893 0.0921	-0.07715 0.1894	0.09714 0.0981	0.40923 ** <.0001	0.49212 ** <.0001	1	0.41323 ** <.0001	-0.3857 ** <.0001	-0.1019 0.0827
CP	0.16129 ** 0.0058	0.16619 ** 0.0045	0.18047 ** 0.002	0.45719 ** <.0001	0.41736 ** <.0001	0.41054 ** <.0001	0.41323 ** <.0001	1	-0.48333 ** <.0001	-0.00914 0.8766
RG	-0.28182 ** <.0001	-0.29739 ** <.0001	0.22447 ** 0.0001	-0.15248 ** 0.0092	-0.3348 ** <.0001	-0.22425 ** 0.0001	-0.3857 ** <.0001	-0.48333 ** <.0001	1	0.04105 0.4855
%H	0.1524 ** 0.0092	0.11139 0.0577	-0.00655 0.9115	0.06384 0.2777	0.066 0.2618	0.01195 0.8391	-0.1019 0.0827	-0.00914 0.8766	0.04105 0.4855	1

\*\* y \*, significancia al nivel de  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$  respectivamente; FM= Floración masculina, FF= Floración femenina, AP= Altura de planta, AM= Altura de mazorca, AR= Acame de raíz, AT= Acame de tallo, PF= Plantas con *Fusarium spp.*, CP= Calificación de planta, RG= Rendimiento de grano, %H= Por ciento de humedad.

**Cuadro A. 5 Media de rendimiento de grano de los primeros 161 híbridos**

HIB	Media												
110	16.0527597	46	14.0374794	231	13.5035111	251	13.2169589	253	12.9210994	117	12.7174953	99	12.4759254
269	15.0329106	47	13.948629	183	13.4929642	71	13.2139629	153	12.9067812	228	12.7021346	51	12.4592285
206	14.9573465	49	13.9364869	1	13.4766658	26	13.2026992	273	12.8976698	233	12.690749	23	12.4513521
163	14.8642881	242	13.8994654	229	13.4699106	43	13.2020977	67	12.8955338	201	12.6824675	282	12.4183557
274	14.7544477	240	13.8826736	268	13.4562289	151	13.1830571	36	12.8915453	94	12.6750387	146	12.4007046
113	14.6670898	261	13.8039818	13	13.4561067	59	13.1797101	115	12.8879257	145	12.6649615	227	12.3954772
257	14.6444547	202	13.7800324	109	13.4488301	212	13.1752571	259	12.8876642	114	12.6613235	14	12.3948882
248	14.6394245	171	13.7797054	50	13.4333377	154	13.1727877	262	12.8591345	98	12.6246143	78	12.3917835
3	14.6324365	33	13.7753155	128	13.41268	129	13.095071	189	12.8590116	29	12.5988528	22	12.3910792
275	14.6084151	42	13.752362	225	13.403353	72	13.0763475	39	12.848695	230	12.5968632	83	12.380072
180	14.5206309	93	13.7515513	177	13.3891981	197	13.0756299	162	12.8404362	144	12.5910081	235	12.3764512
226	14.4963058	6	13.6827531	179	13.3589256	82	13.0525358	60	12.8391346	25	12.5850248	172	12.3575587
266	14.4792442	91	13.6754981	260	13.3450194	191	13.0504511	65	12.8380068	176	12.575693	27	12.355238
111	14.4171619	138	13.6554638	66	13.337996	76	13.0258491	234	12.8294781	264	12.5734185	157	12.3500364
205	14.4000804	186	13.6512708	136	13.3280041	258	13.0231444	155	12.8224728	156	12.5353288	215	12.3206447
220	14.3908518	62	13.650938	4	13.3268522	85	13.019029	267	12.7945817	21	12.5244731	277	12.3176973
135	14.3334407	7	13.6103377	54	13.3223027	140	13.0115941	150	12.7837583	56	12.5179618	53	12.3011601
161	14.2025959	58	13.6097618	31	13.3144435	55	12.9923226	2	12.7749694	106	12.5135971	119	12.2994023
247	14.1697755	238	13.5939768	121	13.3049044	104	12.9770631	68	12.7663499	246	12.4965865	249	12.2856226
48	14.1546652	5	13.5356824	88	13.2925775	70	12.9767996	208	12.7656437	200	12.493414	213	12.2694636
170	14.1303105	192	13.5265387	30	13.2784867	270	12.976758	147	12.7623159	243	12.4915749	131	12.2358043
86	14.0600439	164	13.5125288	255	13.2647518	75	12.9741747	101	12.7584546	276	12.4898929	143	12.1905707
173	14.0424008	165	13.5047651	112	13.2172157	199	12.9731489	217	12.7280792	61	12.4760477	34	12.1899723

