

## PROPUESTA PARA INTEGRAR UN PATRÓN HETERÓTICO DE MAÍZ DE GRANO AMARILLO PARA LA ZONA DE TRANSICIÓN DE MÉXICO. I. MÉTODO Y FORMACIÓN DE POBLACIONES

### A PROPOSAL FOR DEVELOPING A YELLOW MAIZE HETEROTIC PATTERN FOR THE TRANSITION ZONE OF MÉXICO. I. METHOD AND POPULATIONS DEVELOPMENT

José L. Ramírez Díaz<sup>1\*</sup>, Víctor A. Vidal Martínez<sup>2</sup>, Alejandro Ledesma Miramontes<sup>1</sup>, Margarito Chuela Bonaparte<sup>1</sup>, Alfonso Peña Ramos<sup>3</sup>, J. Ariel Ruiz Corral<sup>1</sup> y José Ron Parra<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Km 8 carr. Libre Tepatitlán-Lagos de Moreno. 47600, Tepatitlán, Jalisco. <sup>2</sup>Campo Experimental Santiago, INIFAP. Km 6 entronque carr. internacional México-Nogales. Apdo. Postal 100. Santiago Ixcuintla, Nayarit. <sup>3</sup>Campo Experimental Pabellón, INIFAP. Km 32.5 carr. Aguascalientes-Zacatecas. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. <sup>4</sup>Instituto de Manejo y Aprovechamiento de Recursos Fitogenéticos, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. Km 15.5 carr. Guadalajara-Nogales. Apdo. Postal 129. 45110, Las Agujas, Nextipac, Zapopan, Jalisco.

\* Autor para correspondencia (ramirez.joseluis@inifap.gob.mx.)

#### RESUMEN

Se han desarrollado híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.) para la zona de transición de México (1900 a 2200 m de altitud), en los cuales se ha combinado germoplasma generado independientemente en las regiones del subtrópico y de los Valles Altos; sin embargo, no existe una estrategia combinada de mejoramiento genético que sea específica para la zona de transición. Los objetivos de esta investigación fueron: a) Presentar una estrategia de mejoramiento para integrar un patrón heterótico de maíz de grano amarillo para la zona de transición de México, y b) Describir la formación de poblaciones que conforman el patrón heterótico para esa zona. La estrategia para el primer objetivo incluye el método de mejoramiento y los tipos de híbridos a formar; para el segundo, en seis localidades de la región Centro-Occidente de México, se evaluaron cruces dialélicas hechas entre poblaciones de origen tropical y templado de maíz de grano amarillo; se efectuó la conversión de progenitores de grano blanco a amarillo; y se establecieron ensayos de híbridos comerciales de grano amarillo y de familias de medios hermanos de grano amarillo con germoplasma de Valles Altos y de la zona de transición, en Tepatitlán, Jal. Se concluyó que la metodología propuesta para la integración de patrones heteróticos y de variedades mejoradas para la zona de transición de México, técnicamente presenta más ventajas que el enfoque actual del Programa de Maíz del INIFAP. Se confirmó que el germoplasma templado puede hacer contribuciones importantes en el rendimiento de grano y precocidad para esa zona, por lo que ese germoplasma se utilizó como fuente en la conversión de la línea de grano blanco a amarillo "LPC1A-9R-1-1". Las familias que integraron la población INIFAP Amarillo Dentado-3 tuvieron mayor tolerancia al acame y más sanidad de mazorca, con un ciclo de madurez similar al Criollo Amarillo Zamorano, el mejor criollo amarillo de la región.

**Palabras clave:** *Zea mays*, germoplasma templado, heterosis, métodos de fitomejoramiento.

#### SUMMARY

Maize (*Zea mays* L.) commercial hybrids for the Mexican transition zone (1900 to 2200 m, altitude) have been developed by combining subtropical x High Valleys germplasm created independently in each zone. However, there is not a combined breeding strategy specific for the transition zone. The objectives of this research were: a) to present

a crop breeding strategy for integrating a yellow grain maize heterotic pattern for the transition zone of Mexico, and b) to describe the maize population development for integrating an heterotic pattern for this zone. For the first objective, the strategy includes both breeding methodology and types of hybrids to be generated. For the second objective, diallel crosses among tropical and temperate yellow maize populations were evaluated in six locations of the West-Central region of México. White-grain progenitors were converted to yellow-grain types, and yield trials involving yellow-grain commercial hybrids and yellow-grain half sib families obtained by crosses with high valleys and transition germplasm were established at Tepatitlán, Jal. It was concluded that the proposed methodology for integrating heterotic patterns and improved varieties for the transition zone of México has technically more advantages than the actual method used in the Maize Program at INIFAP. It was confirmed that temperate maize germplasm could contribute importantly in both grain yield and earliness for the transition zone, thus this germplasm was used for the conversion of white-grain line "LPC1A-9R-1-1" to yellow-grain. Selected half sib families used to integrate "INIFAP-Amarillo Dentado-3" population had similar maturity but more tolerance to lodging and healthy ears than landrace Amarillo Zamorano, the best yellow native maize in the region.

**Index words:** *Zea mays*, temperate germplasm, heterosis, plant breeding methods.

#### INTRODUCCIÓN

La heterosis en maíz (*Zea mays* L.) se ha explotado en forma sistemática desde inicios del siglo XX, que junto con la endogamia y los patrones heteróticos conforma el trinomio requerido para producir híbridos comerciales de maíz. Los patrones heteróticos son modelos de combinación entre progenitores que expresan alta heterosis en una o más características de interés económico, lo que permite sistematizar el desarrollo de híbridos de maíz. Inicialmente la identificación de los patrones heteróticos fue empírica (Hallauer, 1999); pero con los diseños genéticos generados por Griffing (1956), Gardner y Eberhart (1966) y el Diseño II de Carolina del Norte (Comstock y Robinson, 1948), se

simplificó su identificación y aumentó su efectividad.

La heterosis está asociada con la diversidad genética (Miranda, 1999), y los fitomejoradores la usan para formar o enriquecer los patrones heteróticos; pero el manejo de la diversidad genética debe ser selectiva y dosificada para no tener heterosis negativa (Dos Santos *et al.*, 2000), e incluso evitar problemas para efectuar la selección (Xia *et al.*, 2005). Los marcadores moleculares son una herramienta útil para identificar, separar y agrupar germoplasma, pero no han sido efectivos para identificar patrones heteróticos debido a la dificultad para predecir con precisión la heterosis en función de las distancias genéticas. Por ello las evaluaciones de campo siguen siendo indispensables para identificar los patrones heteróticos (Melchinger, 1999; Dhillon *et al.*, 2009).

En el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de México, se han desarrollado híbridos comerciales de grano blanco mediante la combinación de germoplasma adaptado a áreas ecológicas específicas. Por ejemplo, las cruzas de maíces tropicales x subtropicales dieron origen a los híbridos 'HV-313' (González *et al.*, 2003), 'H-358', 'H-516' y 'H-562' recomendados para zonas tropicales y subtropicales (Ramírez *et al.*, 1995a; Gómez *et al.*, 2001, 2008); en los Valles Altos la cruce simple CML-246 x CML-242 (cuyo germoplasma base conjunta materiales de Valles Altos templados y subtropical-tropicales) combinada con las líneas M-39 y M-17 x M-18 de la raza Cónico, son progenitores de los híbridos 'H-40' y 'H-50', respectivamente (Eagles y Lothrop, 1994; Espinosa *et al.*, 2003; Velázquez *et al.*, 2005); y en la zona de transición (entre 1900 y 2200 m de altitud), las combinaciones de germoplasma subtropical x Valles Altos dieron origen a los híbridos 'H-133', 'H-135', 'H-149' (Gómez *et al.*, 1996) y 'H-151'. A pesar de estos logros, es necesario sistematizar y fortalecer la estrategia de integración y uso de patrones heteróticos para desarrollar variedades mejoradas adaptadas a las distintas áreas productoras de maíz de México.

La identificación de patrones heteróticos de maíz de grano amarillo es reciente en el INIFAP (Ramírez *et al.*, 2004, 2007), pues se requiere generar variedades comerciales de grano amarillo con el objeto de reducir el déficit de 7.2 millones de toneladas de grano que tiene el país (SIAP, 2010). Los objetivos de esta investigación fueron: a) Presentar una estrategia de mejoramiento para identificar un patrón heterótico de maíz de grano amarillo, y b) Describir la formación de poblaciones que conforman tal patrón heterótico de maíz para la zona de transición de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

La zona geográfica de transición (ZTM), entre el subtrópico y los Valles Altos de México se ubica entre los 1900 y 2200 m de altitud, cuya área agrícola abarca poco más de cinco millones de hectáreas y representa 17 % del área nacional (INEGI, 2002). La mayor superficie se concentra en la región centro y norte-centro del país, y en el sur existen áreas pequeñas en los Estados de Chiapas y Oaxaca. En la ZTM se cultivan 879 mil ha de riego, de las cuales, 576 mil ha se ubican en regiones con menos de 500 mm de precipitación, 165 mil ha en zonas entre 500 y 700 mm y solo en 138 mil hectáreas la precipitación es mayor de 700 mm. En el primer caso, la producción de maíz dependería por completo del riego; en el segundo, de "punta de riego" con dos o tres riegos adicionales; y en el tercero, de secano o de punta de riego con un riego de germinación y un probable riego adicional.

El área que se cultiva de secano (temporal) en la ZTM representa 83.1 % (poco más de 4 millones de ha) del área agrícola total, de las cuales 61.3 % se ubican en regiones con menos de 500 mm de precipitación, 18.8 % entre 500 y 700 mm, y 19.9 % en regiones con más de 700 mm. En el primer caso se consideran regiones no aptas para el cultivo de maíz, en el segundo se requieren de variedades de maíz con madurez precoz a intermedia, y en el tercero variedades con madurez intermedia a tardía.

El Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, sede de este estudio, se ubica en Tepatitlán, Jalisco, México (en la región de Los Altos de Jalisco) dentro de la ZTM. Sus características agroclimáticas son: altitud, 1934 m; precipitación media anual, 822 mm con 88 d de lluvia apreciable; estación de crecimiento, 135 d (inicia el 16 de junio y termina el 28 de octubre); y temperaturas máxima, mínima y media anual durante la estación de crecimiento, de 25.1, 10.5, y 17.8 °C, respectivamente (Flores *et al.*, 2009).

### Estrategia de hibridación interregional en el programa de maíz del INIFAP

En el INIFAP la estrategia actual de hibridación interregional en maíz ha sido combinar líneas y cruces simples élite del trópico x subtrópico, subtrópico x Valles Altos, y subtrópico x región semiárida del norte, para generar híbridos simples, trilineales y dobles adaptados a regiones de mediana, buena y muy buena productividad. Esta metodología, en el corto plazo, ha sido efectiva para desarrollar híbridos comerciales; pero en el mediano y largo plazo la estrategia resulta incierta debido a que solo se explotan efectos genéticos no aditivos y no contempla un patrón heterótico de

referencia que ofrezca la opción de obtener progenitores de forma permanente para capitalizar los efectos aditivos y no aditivos en las poblaciones.

La estrategia actual podría complementarse al definir primero los patrones heteróticos intrarregionales en función del germoplasma disponible: líneas, poblaciones o ambas, y el tipo de madurez deseado (precoz, intermedio o tardío). Posteriormente se aplicaría un esquema de mejoramiento interregional basado en el desarrollo de los patrones heteróticos, que permita el aprovechamiento integral del germoplasma de ambas regiones. Para la ZTM el tipo de combinación más exitosa ha sido subtropical x Valles Altos.

### Esquema de mejoramiento propuesto

Una vez que se define el patrón heterótico entre las áreas ecológicas, el método de selección a aplicar será la selección recurrente recíproca, debido a que explota simultáneamente los efectos aditivos y no aditivos (Comstock *et al.*, 1949) y la heterosis se incrementa entre las poblaciones conforme se avanza en los ciclos de selección (Hallauer, 1999).

En el caso de la ZTM el patrón heterótico que se propone se integraría con una población subtropical (ST) y otra de Valles Altos (VA), las cuales de preferencia deben ser parte de un patrón heterótico de cada zona ecológica. Como ilustración del método, se supone un patrón heterótico de Valles Altos (VA-A x VA-B) y otro subtropical (ST-A x ST-B), cuyas poblaciones, VA-B y ST-A, poseen la mejor aptitud combinatoria. Para aplicar el método de selección recurrente recíproca se realizan los pasos siguientes: a) Derivar líneas de cada población, de preferencia hasta  $S_4$ , en cada área ecológica, subtropical y Valles Altos; b) Formar mestizos, líneas  $S_4$  ST-A x VA-B y líneas  $S_4$  VA-B x ST-A; aquí se sugiere formar los mestizos en su área ecológica respectiva debido a que ahí las líneas tienen su mejor expresión y se obtendrá más semilla, y los probadores, aun cuando son de otra área ecológica, por ser poblaciones, amortiguarán más el efecto ambiental; c) Evaluar mestizos en localidades de la ZTM y seleccionar de 8 a 10 líneas con mejor aptitud combinatoria general (ACG); d) Con las líneas seleccionadas en la ZTM, VA-B<sub>T</sub>'S y ST-A<sub>T</sub>'S, hacer las cruzas posibles dentro de cada población con el modelo IV de Griffing (1956); así como las cruzas posibles interpoblacionales, VA-B<sub>T</sub> x ST-A<sub>T</sub>, con el Diseño II de Carolina del Norte (Comstock y Robinson, 1948); e) Con las cruzas posibles de cada población, VA-B<sub>T</sub>'S y ST-A<sub>T</sub>'S, se forman dos grupos: el primero es un compuesto balanceado de todas las cruzas que se utiliza para obtener la generación  $F_2$  del primer ciclo de selección ( $C_1$ ), denominando las poblaciones como VA-B<sub>T</sub>  $C_1$  y ST-A<sub>T</sub>  $C_1$ , compuesto que sería el punto de partida para el siguiente ciclo de selección, que da origen al patrón heterótico para la ZTM, VA-B<sub>T</sub> x ST-A<sub>T</sub>. El segundo grupo de cruzas sim-

ples posibles VA-B 'S y ST-A 'S y las cruzas interpoblacionales se evalúan en ensayos uniformes en localidades de la ZTM; f) Con base en los resultados de las evaluaciones de las cruzas posibles de cada población, se forman cruzas trilineales y dobles que se evalúan en ensayos uniformes en la ZTM para seleccionar las sobresalientes en años y localidades (Figura 1). Otra ventaja de este método es que permite calcular ACG intra- y ACG interpoblacional, que permite confirmar las líneas superiores.

El uso de las progenies generadas y los tipos de combinaciones que se proponen, sería: las cruzas simples seleccionadas VA-B<sub>T</sub> x ST-A<sub>T</sub> pueden liberarse como híbridos comerciales o utilizarse como probadores para formar cruzas trilineales con líneas derivadas de los patrones heteróticos originales VA-A y ST-B (Figura 2). También pueden formarse híbridos trilineales con cruzas simples de los patrones heteróticos originales combinadas con líneas de VA-B<sub>T</sub> y ST-A<sub>T</sub> o cruzas dobles si se combinan con cruzas intrapoblacionales de VA-B<sub>T</sub>'S y ST-A<sub>T</sub>'S, así como cruzas interpoblacionales al combinar los sintéticos VA-B<sub>T</sub>'S  $F_2$  x ST-A<sub>T</sub>'S  $F_2$  (Figura 1).

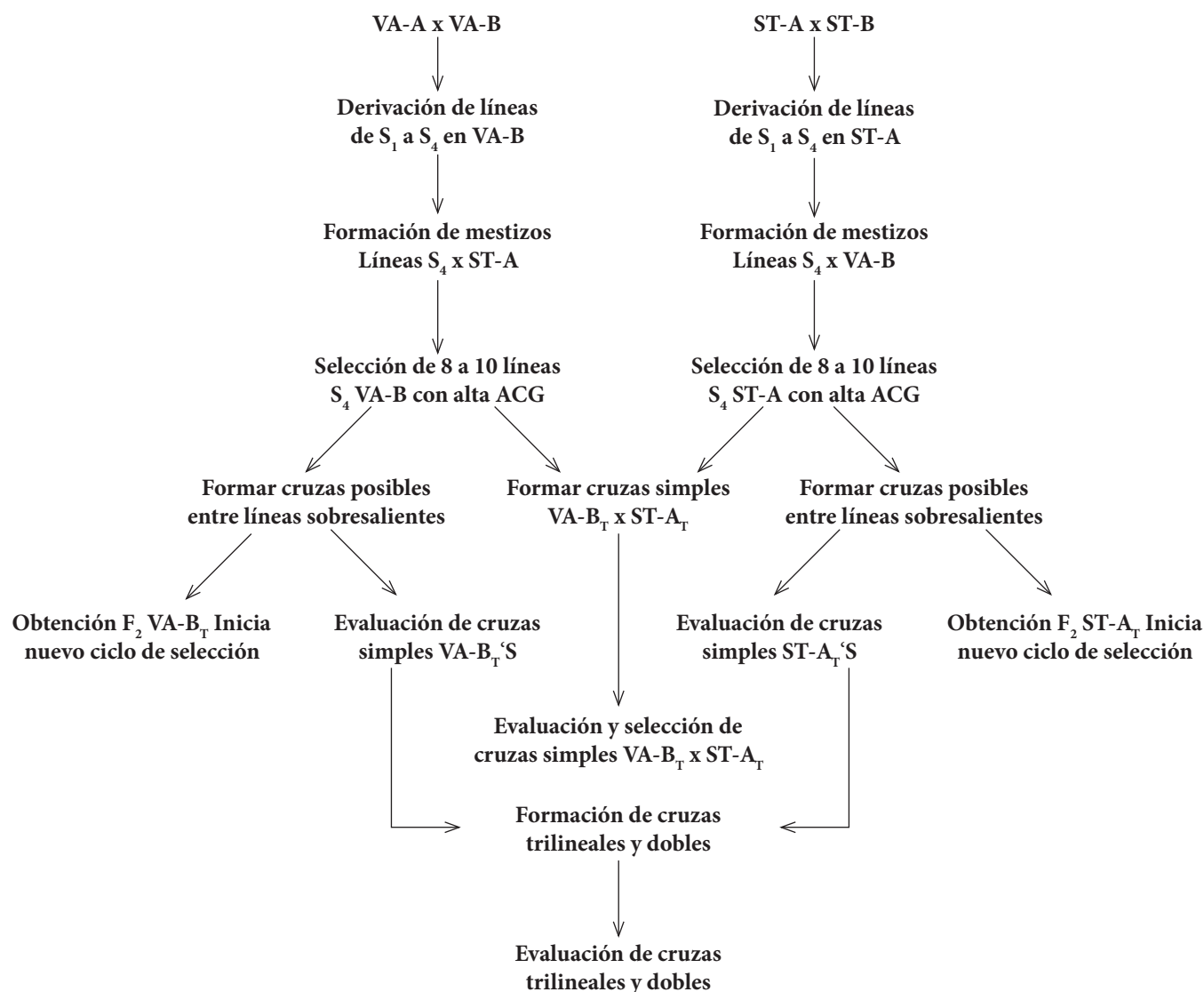
En todos los casos el objetivo es de que en la cruce haya complementación con el patrón heterótico. Probablemente después de cuatro o cinco ciclos de selección en el patrón heterótico de transición, puedan formarse cruzas dobles mediante la combinación de cruzas simples VA-B<sub>T</sub> x ST-A<sub>T</sub> con cruzas simples de los patrones heteróticos originales VA-B x VA-B y ST-A x ST-B, debido a que la selección se practicó en ambientes contrastantes de subtropical, Valles Altos y transición, y se esperaría que las poblaciones fueran más divergentes y con más heterosis (Figura 2).

La metodología anterior se ejemplifica para la ZTM, pero los principios son generales y podrían aplicarse en la combinación de germoplasma trópico x subtropical que sería de importancia nacional, pues en estas zonas se produce más de 60 % del maíz de México.

## IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA

### Formación de poblaciones e integración del patrón heterótico para la zona de transición

El genotipo que se tomó de referencia para integrar el patrón heterótico de la ZTM fue el Criollo Amarillo Zamorano (Figura 3), que pertenece a la raza de maíz Zamorano Amarillo (Sánchez y Goodman, 1992). Este criollo es de ciclo intermedio-precoz (72 a 74 d a antesis) y su madurez se ajusta a la estación de crecimiento de Los Altos de Jalisco, misma que es representativa del área de buen temporal y punta de riego de la ZTM.



**Figura 1.** Formación de un patrón heterótico e híbridos de maíz para la zona de transición de México (ZTM). VA-A = población Valles Altos-A; VA-B = población Valles Altos-B; ST-A = población subtropical-A; ST-B población subtropical-B; VA-B<sub>T</sub> = población Valles Altos-B seleccionada en la zona de transición; ST-A<sub>T</sub> = población subtropical-A seleccionada en la zona de transición; VA-B<sub>T</sub>'S = cruces entre líneas de Valles Altos de la población VA-B seleccionadas en la zona de transición; ST-A<sub>T</sub>'S = cruces entre líneas subtropicales de la población ST-A seleccionadas en la zona de transición.

El patrón heterótico de maíz amarillo para transición se formó a partir del patrón heterótico de grano amarillo subtropical de madurez intermedia "LPC1A RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub> x LB18A RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub>" y de la población de grano amarillo con germoplasma de Valles Altos-transición "INIFAP-Amarillo Dentado-3". La población subtropical seleccionada "LPC1A RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub>" se generó a partir de la línea de grano blanco "LPC1-9R-1-1" de origen tropical y ciclo tardío, derivada de la población Pool 20 (Ramírez *et al.*, 1995b), que fue trasformada a grano amarillo mediante el método de retrocruza limitada con un donador de ciclo precoz cuya gene-

ración F<sub>2</sub> se manejó como población segregante (Ramírez *et al.*, 2007). La población "INIFAP-Amarillo Dentado-3" proviene de la población denominada "Franco", integrada con la generación F<sub>2</sub> de 52 cruces simples amarillas de ciclo precoz de Valles Altos (100 g por cruza), recombinadas libremente y en coexistencia con el Criollo Amarillo Zamorano. Las 52 cruces amarillas provenían de un ensayo del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), que en su mayoría se hicieron con líneas de Valles Altos derivadas de la Pob. 86 combinadas con líneas de poblaciones denominadas como A. P. R. L. H., A. P. V. C.,



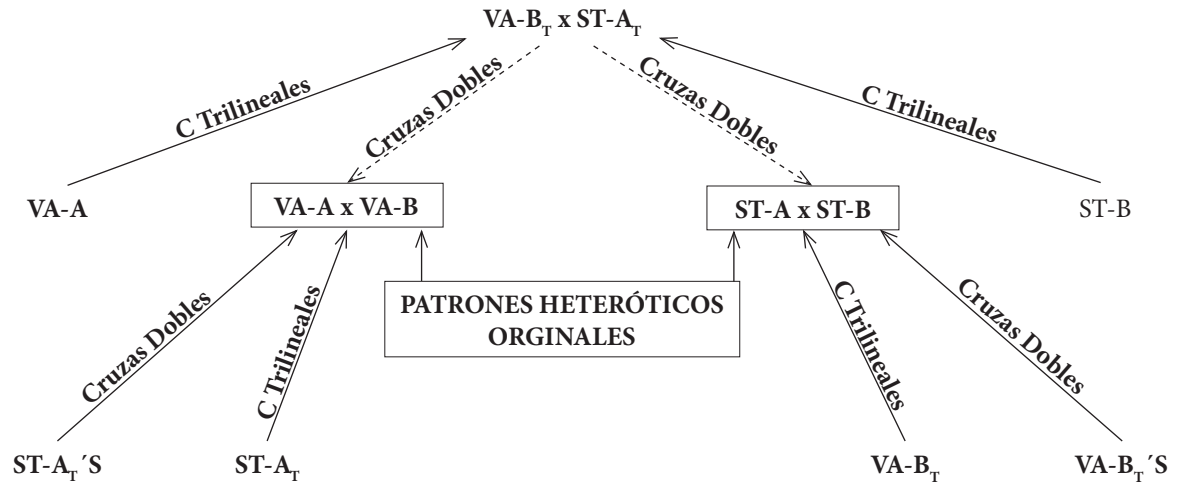


Figura 2. Esquema de combinación entre líneas y cruzas sobresalientes en la zona de transición con los patrones heteróticos originales de Valles Altos y del subtrópico para el desarrollo de diversos tipos de híbridos. VA-A = población Valles Altos-A; VA-B = población Valles Altos-B; ST-A = población subtropical-A; ST-B población subtropical-B; VA-B<sub>T</sub> = población Valles Altos-B seleccionada en la zona de transición; ST-A<sub>T</sub> = población subtropical-A seleccionada en la zona de transición; VA-B<sub>T</sub>'S = cruzas entre líneas de Valles Altos de la población VA-B seleccionadas en la zona de transición; ST-A<sub>T</sub>'S = cruzas entre líneas subtropicales de la población ST-A seleccionadas en la zona de transición; .....> = formación de cruzas dobles a mediano plazo.



Figura 3. Raza de maíz Zamorano Amarillo, usada como modelo para integrar el patrón heterótico en la formación de híbridos de grano amarillo para la zona de transición en México (1900 a 2200 msnm).

y líneas CML's x líneas de la Pob. 86. El mejoramiento de la población subtropical "LPC1A RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub>" se realizó en Tlajomulco, Jal. y el de transición "INIFAP-Amarillo Dentado-3" en Tepatitlán, Jal.

En la integración del patrón heterótico de grano amarillo para la zona de transición se consideraron los antecedentes de patrones de combinación del Programa de Maíz del INIFAP, los estudios de Eagles y Lothrop (1994), Oyervides-García *et al.* (1985), Ron y Hallauer (1997), Espinoza *et al.* (2003), Velázquez *et al.* (2005) y Xia *et al.* (2005); así como la estrategia aquí presentada (Figuras 1 y 2). Paralelamente se hicieron trabajos de campo con germoplasma comercial y experimental de grano amarillo para determinar el tipo de germoplasma a utilizar como donador en la conversión de grano blanco a amarillo de la línea "LPC1-9R-1-1", pues en el INIFAP no había germoplasma élite de grano amarillo.

En los trabajos de campo se efectuó un estudio de cruza dialélicas que incluyó ocho poblaciones tropicales: Pob 28 C<sub>10</sub>, Sint. 9524, Sint. 9528, Pob 36 C<sub>11</sub>, Pool 31 C<sub>23</sub>, Pool 21 C<sub>23</sub>, Pool 26 TLYD C<sub>26</sub>, Sint. resistente a roya, y dos de origen templado: Comp. BC y Comp. Iowa representativas del patrón heterótico B-73 y Mo-17. Las cruza se hicieron en condiciones de riego en el ciclo otoño-invierno (OI) 2000-2001, en el Campo Experimental de Santiago, Ixcuintla, Nay. y se evaluaron en el ciclo primavera-verano (PV) 2001 en condiciones de temporal, en tres localidades del Estado de Jalisco (Tepatitlán, Gómez Farías, La Huerta), una en Peña del Panal, Mich., y otra en Santa María del Oro, Nay., ubicadas a 1934, 1678, 300, 1880 y 800 m de altitud, respectivamente.

El diseño experimental fue látice simple 8 x 8, que incluyó las cruza y sus progenitores y nueve testigos. El tamaño de parcela fue de un surco de 5.0 m de longitud y 0.80 m entre surcos. Se registraron datos de rendimiento de grano y características agronómicas de planta, pero sólo se presentan los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) para rendimiento de grano, los cuales se calcularon con el programa Diallel (1996). También en el ciclo PV 2001, en Ocotlán (1790 m de altitud), Jal. y las cinco localidades señaladas anteriormente, se estableció un experimento con 18 variedades comerciales y experimentales de maíz de grano amarillo y blanco, en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, donde el tamaño de parcela fue de dos surcos de 4.0 m de largo distanciados a 0.80 m. Ambos experimentos se sembraron a 62 500 plantas ha<sup>-1</sup>.

Para generar la población "INIFAP Amarillo Dentado-3" se seleccionaron 200 familias de medios hermanos maternos provenientes de la población amarilla Franco, las cuales se evaluaron en el ciclo PV 2002 en condiciones

de temporal, en Tepatitlán, Jal.; como testigos de grano amarillo se utilizaron al Criollo Amarillo Zamorano, los híbridos 'Z-806' y 'P-3099'; y la cruza intervarietal Sint. A x Sint. B. El diseño experimental fue bloques completos al azar y el tamaño de parcela fue un surco de 4.0 m de largo con 0.80 m entre surcos y una densidad de población de 62 500 plantas ha<sup>-1</sup>. Se midieron las variables: rendimiento de grano seco, sin corregir por humedad (kg ha<sup>-1</sup>), número de días a floración masculina y femenina, altura de planta y mazorca (cm), y porcentajes de acame de raíz, tallo, mazorcas sanas y podridas. El manejo agronómico de los experimentos se hizo con base en las recomendaciones generadas por el INIFAP para el cultivo del maíz en las localidades de evaluación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Cruza dialélicas

Hubo diferencias estadísticas significativas en ACG para rendimiento de grano entre las poblaciones de maíz amarillo, en todas las localidades de evaluación excepto en Gómez Farías (Cuadro 1). En Tepatitlán, localidad de transición, las poblaciones de origen templado Comp. BC y Comp. Iowa tuvieron ACG positiva y significativa, en comparación con el resto de poblaciones de origen tropical cuya ACG fue muy baja o negativa. En las demás localidades las poblaciones templadas tuvieron ACG negativa y el valor más alto se obtuvo en La Huerta, Jal. (300 m de altitud). Estos resultados indican que el germoplasma templado aporta genes importantes en la zona de transición y su aprovechamiento se reduce conforme disminuye la altura sobre el nivel del mar, lo que coincide con los resultados de Oyervides-García *et al.* (1985) y las propuestas de Ron y Hallauer (1997) para uso de germoplasma exótico.

### Híbridos comerciales y experimentales de grano blanco y amarillo

En el análisis combinado hubo diferencias estadísticas significativas ( $P \leq 0.05$ ) en todas las variables, para las fuentes de variación ambientes, variedades y la interacción variedad x ambiente, excepto para porcentaje de acame de raíz en donde sólo hubo diferencias entre localidades; en altura de mazorca no se detectaron diferencias en la interacción variedad x ambiente.

Al comparar el rendimiento de grano de los híbridos en promedio de seis localidades (Cuadro 2), ninguno de los híbridos comerciales y experimentales de grano amarillo superó el rendimiento de grano del mejor híbrido comercial de grano blanco ('HCB-3'), y la diferencia fue significativa. Asimismo, las diferencias entre las medias de los híbridos comerciales de grano amarillo y el testigo 'HCB-3' oscilaron

**Cuadro 1. Aptitud combinatoria general del rendimiento de grano de las cruzas dialélicas entre 10 poblaciones de maíz amarillo en cinco ambientes. PV 2001.**

Población	Tepatlán, Jal.	Gómez Farías, Jal.	La Huerta, Jal.	P. del Panal, Mich.	Sta. Ma. Oro, Nay.
Pob. 28 C10	-18	165	1103**	559*	46
Pob. 31 C8	95	213	-558	357	-153
Sintético-S9524	-494**	-169	850*	-312	2
Sintético-S9528	-278	-153	191	198	271
Pob. 36 C11	-308*	125	345	179	357
Pool 21 C23	-254	-245	-141	88	61
Pool-26 TLYD C26	-631**	405	537	-53	156
Sint. Am. Resist. a Roya	74	-125	893**	335	63
Comp. BC	858 **	-203	-1760**	-788**	-141
Comp. Iowa	955 **	-13	-1459**	-562*	-662*

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

entre 4 y 35 %, y en los experimentales entre 9 y 20 %, por lo se concluyó que en la región centro occidente de México no existían, en ese momento, maíces de grano amarillo competitivos con los de grano blanco.

Con respecto a los resultados obtenidos en Tepatlán, zona de transición, a diferencia de los resultados del análisis conjunto, ningún híbrido comercial de grano blanco, ni experimental de grano amarillo superó el rendimiento de grano del testigo local Criollo Amarillo Zamorano, y las diferencias fueron significativas ( $P \leq 0.05$ ), excepto el de la crusa (345C4-80-1-1-1-4-1) x LPC21. Sin embargo, al comparar al Criollo Amarillo Zamorano con los híbridos comerciales de grano amarillo, el rendimiento del híbrido 'HCA-6' fue estadísticamente superior a los anteriores e igual al híbrido 'HCA-4' (Cuadro 3). Por el tipo de mazorca se concluyó que ambos híbridos tenían germoplasma templado, lo que confirma los resultados del estudio de cruas dialélicas (Cuadro 1). En características agronómicas sólo los híbridos 'HCA-6' y 'HCA-4' tuvieron precocidad similar al Criollo Amarillo Zamorano, pero con mejor calidad de raíz y tallo (Cuadro 3).

La información de los Cuadros 1, 2 y 3 fue la base para seleccionar el tipo de germoplasma y los donadores para la conversión de tres patrones heteróticos de grano blanco a amarillo para la zona subtropical de México (Ramírez *et al.*, 2007). En la crusa de grano blanco de ciclo intermedio LPC1-9R-1-1 x LB\*\*18 se seleccionó como donador al híbrido 'HCA-6' para la conversión a amarillo del progenitor LPC1-9R-1-1; con ello se transfirió precocidad a la línea y se preparó la población para combinarla con germoplasma de Valles Altos y cubrir la zona de transición.

### Formación de la población INIFAP-Amarillo Dentado-3

Resultó una grande variabilidad fenotípica entre familias de medios hermanos, cuyos valores mínimos y máximos fueron: rendimiento de grano, 2231 a 5262 kg ha<sup>-1</sup>; número de días a floración masculina y femenina, 61 a 80 d; porcentaje de acame de raíz y tallo, de 0 a 19 %; porcentaje de mazorcas sanas 0 a 35 %; y porcentaje de mazorcas podridas entre 4 y 36 % (Cuadro 4). Como la variación en precocidad fueron 19 d, con las familias sobresalientes se formaron dos sintéticos: "INIFAP Amarillo Dentado-2", con floraciones masculinas entre 62 y 67 d, orientado para regiones de transición de mediana productividad; e "INIFAP Amarillo Dentado-3", con floraciones entre 66 y 75 d para regiones de transición de mediana a buena productividad.

La población "INIFAP Amarillo Dentado-3" se integró con 16 familias seleccionadas con 7.92 % de presión de selección, en donde además de la precocidad se consideraron como criterios de selección al rendimiento de grano, la tolerancia al acame de raíz y tallo y la sanidad de mazorca. Al comparar las familias seleccionadas vs. el Criollo Amarillo Zamorano, nueve de ellas tuvieron rendimiento de grano estadísticamente igual; la precocidad promedio de las familias fue de 1 a 3 d más precoz, y fueron superiores en resistencia al acame de raíz y tallo y en sanidad de mazorca. El mejor testigo comercial en rendimiento de grano amarillo fue 'Z-806', pero su ciclo es tardío para las condiciones de temporal de la zona de transición (Cuadro 4). Las familias seleccionadas se recombinaron en el ciclo OI 2003-2004 en el Campo Experimental de Santiago Ixcuintla, Nay., y en el ciclo PV 2004 en Tepatlán, Jal. se obtuvo la generación F<sub>2</sub> de la población "INIFAP Amarillo Dentado-3", a partir del cual se inició el proceso de endogamia para formar líneas,

Cuadro 2. Rendimiento de grano y características agronómicas de maíces de grano blanco y amarillo. Promedio de seis localidades. 2001.

TRAT	GENEALOGÍA	REND	% REND	FM	FF	R	T	AP	AM
Maíces comerciales amarillos									
5	‘HCA-5’	5819	94	68	69	3	12	235	121
3	‘HCA-3’	5591	90	69	69	0	3	236	116
2	‘HCA-2’	5361	86	68	68	2	8	241	119
4	‘HCA-4’	4946	80	64	64	6	9	253	108
18	‘HCA-7’	4601	74	65	66	3	11	224	94
17	‘HCA-6’	4389	71	63	63	1	9	225	101
1	‘HCA-1’	4065	65	65	66	3	12	229	114
	Media	4967	80	66	66	3	9	235	110
Maíces amarillos experimentales									
12	(345C4-80-1-1-1-4-1)xLPC21	5664	91	67	69	2	5	257	129
6	REMACO-1	5491	88	68	68	4	8	252	134
11	(345C4-80-1-1-1-3-1)xLPC21	5337	86	67	68	2	9	253	126
9	Sintético A F <sub>1</sub>	5144	83	70	70	4	3	249	121
8	(CLO2808XCLO2410)xCS U de G	4980	80	66	66	1	2	233	123
7	REMACO-2	4967	80	65	66	2	4	240	118
10	Sintético B F <sub>1</sub>	4950	80	68	69	1	6	237	122
	Media	5219	84	67	68	2	5	246	125
Maíces comerciales blancos									
15	‘HCB-3’	6210	100	70	70	4	3	246	124
13	‘HCB-1’	6090	98	69	69	1	6	248	118
14	‘HCB-2’	5804	93	70	71	2	6	250	115
	Media	6035	97	70	70	2	5	248	119
	Media general	5259		67	68	3	7	242	118
	CV (%)	12		2	2	222	92	5	9
	DMS 0.05 (kg ha <sup>-1</sup> )	305		1.1	2.0	ns	5.0	9.7	8.5

REND = rendimiento de grano seco (kg ha<sup>-1</sup>); FM y FF = número de días a floración masculina y femenina; R y T = porcentaje de acame de raíz y tallo; AP y AM = altura de planta y mazorca (cm).

mestizos y cruza trilineales. Los resultados de la combinación del patrón heterótico formado para la ZTM se darán a conocer en el segundo artículo de esta serie.

CONCLUSIONES

Aquí se presenta una metodología para la generación de patrones heteróticos y de variedades mejoradas para la zona de transición de México, que técnicamente presenta más ventajas que el enfoque conducido hasta ahora en el Programa de Maíz del INIFAP. Esta metodología también

podría aplicarse para formar patrones heteróticos y variedades mejoradas entre las zonas tropical y subtropical de México.

Se confirmó que el germoplasma templado puede hacer contribuciones importantes al rendimiento de grano y precocidad para la zona de transición de México, por lo que se utilizó como fuente en la conversión de la línea “LPC1A-9R-1-1” de grano blanco a amarillo.

Las familias que integraron la población “INIFAP Amarillo



**Cuadro 3. Ensayo uniforme de híbridos comerciales y experimentales de maíz de grano blanco y amarillo. Tepatitlán, Jal. 2001.**

GENEALOGÍA	REND	% REND	FM	FF	AP	AM	R	T	PM
<b>Maíces comerciales amarillos</b>									
'HCA-6'	4510	127	70	68	280	120	0	1	6
'HCA-4'	4184	118	71	69	315	129	0	4	8
'HCA-2'	3761	106	78	77	306	148	0	6	6
'HCA7'	3500	99	75	75	283	121	0	18	9
'HCA-5'	3264	92	80	80	282	147	0	3	6
'HCA-1'	3171	89	75	76	280	135	0	11	8
'HCA3'	3005	85	80	79	286	144	0	3	7
Media	3628	102	76	75	290	135	0	7	7
<b>Maíces amarillos experimentales</b>									
(345 C4-80-1-1-1-4-1) X LPC21	3177	90	78	80	317	159	0	5	10
Sintético A F1	2754	78	81	81	306	141	0	1	8
(345 C4-80-1-1-1-3-1) X LPC 21	2727	77	79	79	316	162	0	3	9
REMACO-2	2447	69	75	77	291	136	0	4	5
REMACO-1	2310	65	81	79	306	166	0	5	11
[(CLO 2808 X CLO 2410) X CS U DE G]	2257	64	78	78	271	140	0	1	8
Sintético B F1	1726	49	82	82	272	143	0	9	19
Media	2485	70	79	79	297	150	0	4	10
<b>Maíces comerciales blancos y testigo amarillo</b>									
Criollo Amarillo Zamorano	3545	100	70	72	346	184	4	25	6
'HCB-2'	2545	72	82	83	292	139	0	6	9
'HCB-3'	2444	69	81	81	296	149	0	1	7
'HCB-1'	2440	69	81	82	287	144	0	10	20
Media	2744	77	79	80	305	154	1	11	11
Media General	2987		77	78	296	145	0	6	9
CV (%)	13		2	2	5	7	200	109	48
DMS 0.05 (kg ha <sup>-1</sup> )	818		3.4	2.9	28.7	20.9	0.9	ns	ns

REND = rendimiento de grano seco (kg ha<sup>-1</sup>); MS = porcentaje de materia seca; FM y FF = número de días a floración masculina y femenina; AP y AM = altura de planta y mazorca (cm); R y T = porcentaje de acame de raíz y tallo; PM = porcentaje de pudriciones de mazorca.

**Cuadro 4. Familias seleccionadas (grupo de precocidad intermedia) de medios hermanos derivados del sintético amarillo precoz progenitoras de la población “INIFAP-Amarillo Dentado-3”. Tepatitlán, Jal.**

GENEALOGÍA	REND	FM	FF	AP	AM	R	T	MSA	MD
MH-114	5262	72	72	272	123	0	8	16	6
MH-6	5102	69	69	265	121	0	2	21	8
MH-16	4833	70	70	277	119	0	3	25	10
MH-12	4725	69	68	293	129	0	3	8	8
MH-105	4715	71	71	273	122	3	0	30	10
MH-1	4679	69	68	267	132	0	5	28	14
MH-15	4492	70	70	283	126	0	0	9	16
MH-139	4453	74	74	268	116	0	5	26	5
MH-19	4452	75	75	283	120	3	8	24	7
MH-71	4305	67	66	273	122	10	0	21	5
MH-160	4225	75	76	267	116	0	0	27	4
MH-144	4203	73	73	273	127	0	12	20	9
MH-151	4098	72	72	281	119	0	3	17	14
MH-65	4018	66	65	256	111	3	3	33	15
MH-174	3917	66	67	265	114	0	3	17	17
MH-53	3594	75	74	265	121	0	6	18	9
Media de familias seleccionadas	4442	71	71	273	121	1.2	3.8	21	10
Media poblacional	3526	65	64	253	109	4	5	14	15
Diferencial de selección	916	6	6	19	13	-2.4	-1.0	7.2	-5
Valores máximos en la población	5262	80	80	293	132	18	19	35	36
Valores mínimos en la población	2231	61	60	223	87	0	0	0	4
Testigo 1 ('Z-806')	5973	80	80	287	141	0	2	14	6
Testigo 2 (Sint. A x Sint. B)	5623	82	81	278	128	0	0	33	4
Criollo Amarillo Zamorano	4745	72	74	311	151	15	10	17	21
P-3099	4277	80	80	246	118	0	7	15	9
Media general	3558	65	64	254	109	3	5	14	14
CV (%)	13	3	2	4	7	169	129	65	47
DMS 0.05 (kg ha <sup>-1</sup> )	905	3.9	2.4	22	16	ns	ns	18.2	13.3

REND = rendimiento de grano seco (kg ha<sup>-1</sup>); FM y FF = número de días a floración masculina y femenina; AP y AM = altura de planta y mazorca (cm); R y T = porcentaje de acame de raíz y tallo; y MSA y MD = porcentaje de mazorcas sanas y dañadas.

Dentado-3" tuvieron más tolerancia al acame, mejor sanidad de mazorca y ciclo de madurez similar al Criollo Amarillo Zamorano, el mejor maíz criollo de grano amarillo en la región.

## BIBLIOGRAFÍA

- Comstock R E, H F Robinson (1948) The components of genetic variance in populations of biparental progenies and their use in estimating the average degree of dominance. *Biometrics* 4:254-266.
- Comstock R E, H F Robinson, P H Harvey (1949) A breeding procedure designed to make maximum use of both general and specific combining ability. *Agron. J.* 41:360-367.
- Dhliwayo T, K Pixley, A Menkir, M Warburton (2009) Combining ability, genetic distances, and heterosis among elite CIMMYT and IITA tropical maize inbred lines. *Crop Sci.* 49:1201-1210.
- Dos Santos M, L Pollak, C A Patto P, P Evaristo O G, L A Peterlini, S Netto P, L Lurenço N (2000) Incorporating different proportions of exotic maize germplasm into two adapted populations. *Gen. & Mol. Biol.* 23:445-451.
- Eagles H A, J E Lothrop (1992) Highland maize from central Mexico-Its origin, characteristics, and use in breeding programs. *Crop Sci.* 34:11-19.
- Espinosa C A, M Tadeo R, J Lothrop, S Aspíroz R, C Tut C, Y Salinas M (2003) 'H-50'. Híbrido de maíz de temporal para los Valles Altos de México (2200 a 2600 msnm). *Agric. Tec. Méx.* 29:89-92.
- Flores L H E, J Ireta M, J F Pérez D, J A Ruiz C, P Díaz M (2009) Identificación de Buenas Prácticas Agrícolas de Campo para Reducir la Degradación del Suelo e Incrementar la Calidad del Agua. Libro Científico Núm. 1. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. CIRPAC-INIFAP. Tepatlán de Morelos, Jal. México. pp:48-49.
- Gámez V A J, M A Ávila P, H H Ángeles A, C Díaz H, H Ramírez V, A Alejo J, A Terrón I (1996) Híbridos de Maíz Liberados por el INIFAP Hasta 1996. Publicación Especial Núm. 16. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Toluca, Edo. de México. 102 p.
- Gardner C O, S Eberhart (1966) Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. *Biometrics* 22:439-452.
- Gómez M N O, J L Ramírez D, A. Turrent F (2001) 'H-516', maíz de alto rendimiento para regiones cálidas y semicálidas de México. Folleto Técnico No. 8. Campo Experimental Iguala. CIRPAS-INIFAP. 20 p.
- Gómez M N O, M Sierra M, M González C, M A Cantú A, A Ramírez F, J J Wong P, M. Manjarrez S, J L Ramírez D, A Espinosa C (2008) 'H-562'. Híbrido de maíz de alto rendimiento para el trópico húmedo y seco de México. *Agr. Téc. Méx.* 34:101-105.
- González E A, J I Jolalpa B, J L Ramírez D, M Chuela B, R Martínez P, S Wood (2003) Evaluación Económica del Mejoramiento Genético de Maíz en México: Híbrido Intervarietal 'HV-313'. Serie: Estudios de Evaluación del Impacto. Publicación Técnica No. 4. INIFAP. México, D. F. 58 p.
- Griffing B (1956) Concept of general and specific combining ability in relation to diallel cross systems. *Aust. J. Biol. Sci.* 9:463-491.
- Hallauer A R (1999) Temperate maize and heterosis. In: *Genetics and Exploitation of Heterosis*. J G Coors, S Pandey (eds). ASA-CSSA-CIMMYT. Madison, WI. pp:353-361.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2002) Carta de Uso del Suelo Serie II. INEGI. México, D. F.
- Melchinger A E (1999) Genetic diversity and heterosis. In: *Genetics and Exploitation of Heterosis*. J G Coors, S Pandey (eds). ASA-CSSA-CIMMYT. Madison, WI. pp:99-113.
- Miranda F J B (1999) Inbreeding depression and heterosis. In: *Genetics and Exploitation of Heterosis*. J G Coors, S Pandey (eds). ASA-CSSA-CIMMYT. Madison, WI. pp:69-80.
- Oyervides-García M, A R Hallauer, H Cortez M (1985) Evaluation of improved maize populations in Mexico and the U.S. *Corn Belt. Crop Sci.* 25:115-120.
- Ramírez D J L, J Ron P, J B Maya L, O Cota A (1995a) 'H-357' y 'H-358'. Híbridos de maíz de cruz simple para la zona subtropical y tropical de México. Folleto Técnico No. 4. Campo Experimental Centro de Jalisco, CIPAC, INIFAP. Tlajomulco, Jalisco, México. 20 p.
- Ramírez D J L, J Ron P, O Cota A (1995b) H315. Híbrido de maíz de ciclo intermedio para la zona subtropical y tropical de México. Folleto Técnico No. 3. Campo Experimental Centro de Jalisco, CIPAC-INIFAP. Tlajomulco, Jalisco, México. 20 p.
- Ramírez D J L, M Chuela B, L Soltero D, J. Franco M, A Morfín V, V A Vidal M, H L Vallejo D, F Caballero H, H Delgado M, R Valdivia B, J Ron P (2004) Patrón heterótico de maíz amarillo para la región Centro-Occidente de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 27:13-17.
- Ramírez D J L, M Chuela B, V A Vidal M, J Ron P, F Caballero H (2007) Propuesta para formar híbridos de maíz combinando patrones heteróticos. *Rev. Fitotec. Mex.* 30:453-461.
- Ron P J, A R Hallauer (1997) Utilization of exotic maize germplasm. *Plant Breed. Rev.* 14:165-187.
- Sánchez G J J, M M Goodman (1992) Relationships among the Mexican races of maize. *Econ. Bot.* 46:72-85.
- SIAP, Sistema (poner nombre completo) (2010) Balanza Nacional y Disponibilidad de Consumo. Información Básica. En línea: [http://www.campomexicano.gob.mx/portal\\_siap/Integracion/EstadisticaDerivada/ComercioExterior/BalanzaDisponibilidad/Anual/2010/maizama10.pdf](http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaDerivada/ComercioExterior/BalanzaDisponibilidad/Anual/2010/maizama10.pdf) (Julio 2012).
- Velázquez C G A, C Tut C, J Lothrop, J Virgen V, Y Salinas M (2005) 'H-40'. Híbrido de maíz de grano blanco para los Valles Altos de México. Folleto Técnico Núm. 21. Campo Experimental Valle de México. CIRCE-INIFAP. 23 p.
- Xia X C, J C Reif, A E Melchinger, M Frish, D A Heisington, D Beck, K Pixley, M L Burton (2005) Genetic diversity among CIMMYT maize inbred lines investigated with SSR Markers: II. Subtropical, tropical, midaltitude, and highland maize inbred lines and their relationships with elite U. S. European maize. *Crop Sci.* 45:2573-2582.