

## DIVERSIDAD AGRO-MORFOLÓGICA DEL MAÍZ CACAHUACINTLE DE LOS VALLES ALTOS DE MÉXICO

### AGRO-MORPHOLOGICAL DIVERSITY OF CACAHUACINTLE MAIZE FROM THE HIGH VALLEYS OF MEXICO

Luis Antonio Flores-Hernández<sup>1</sup>, Fernando Castillo-González<sup>1\*</sup>, Jorge Nieto-Sotelo<sup>2</sup>, María Gricelda Vázquez-Carrillo<sup>3</sup>, Manuel Livera-Muñoz<sup>1</sup>, Ignacio Benítez-Riquelme<sup>1</sup> y Antonio Ramírez-Hernández

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. <sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, Jardín Botánico, Ciudad de México, México. <sup>3</sup>Instituto Nacional de investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia (fcastill@colpos.mx)

#### RESUMEN

La raza de maíz Cacahuacintle se distribuye geográficamente en los Valles Altos del centro de México y se caracteriza por su grano harinoso; las formas típicas han sido descritas; sin embargo, la información sobre la variación agro-morfológica entre subtipos de la raza es limitada, así como las diferencias entre las variantes de las diferentes regiones. Se colectaron 39 poblaciones de maíz Cacahuacintle en los estados de Puebla (Ciudad Serdán), Tlaxcala (Ixtenco) y el Estado de México (Calimaya, Techuchulco de Allende, Amecameca y San Felipe del Progreso), se establecieron experimentos de campo en cuatro ambientes agroecológicos en los años 2018 y 2019, en el Estado de México (Texcoco y Ayapango) y Tlaxcala (Ixtenco). Se registraron 24 variables agro-morfológicas, las cuales se sometieron a análisis de varianza combinado y, a partir de éste, se estimaron las componentes de varianza para genotipos ( $\sigma^2_g$ ), ambientes ( $\sigma^2_a$ ) y la interacción genotipo  $\times$  ambiente ( $\sigma^2_{g \times a}$ ). Diez variables relacionadas con dimensiones de estructuras de mazorca, grano y espiga presentaron valores de repetibilidad  $r = [\sigma^2_g / (\sigma^2_a + \sigma^2_{g \times a})]$  superiores a 0.7, que se consideraron apropiadas para estudiar la diversidad agro-morfológica; con estas variables se realizaron análisis de componentes principales y de conglomerados. Los primeros dos componentes principales explicaron el 68 % de la variación total. En el plano definido por los dos primeros componentes principales se formaron tres grupos en función de tamaño y forma de grano, principalmente: 1) poblaciones de maíz Chalqueño, incluido como referencia morfológica diferente; 2) poblaciones típicas de Cacahuacintle (Calimaya, Techuchulco y Amecameca, Estado México y Ciudad Serdán, Puebla, predominantemente) y 3) variantes de tipo Cacahuacintle pero de grano más pequeño o menos redondeado (Ixtenco, Tlaxcala; San Felipe, Estado de México); esta aproximación fue consistente con la formación de grupos por el análisis de conglomerados. La diversidad genética entre poblaciones es más amplia de lo que se conocía, con variantes asociadas al origen geográfico.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., Cacahuacintle, diversidad genética, poblaciones, Valles Altos.

#### SUMMARY

The Cacahuacintle maize race geographically is distributed in the Mexican central highlands and it is characterized by its floury grain; typical forms have been described; however, the information on the agro-morphological variation within sub-types is limited, as well as the differences between the variants from different regions. Thirty-nine populations of Cacahuacintle maize were

collected in the states of Puebla (Ciudad Serdán), Tlaxcala (Ixtenco) and State of México (Calimaya, Techuchulco, Amecameca and San Felipe del Progreso) and field experiments were established at four agro-ecological environments in the years 2018 and 2019, in the State of Mexico (Texcoco and Ayapango) and Tlaxcala (Ixtenco). Twenty-four agro-morphological traits were recorded, which were subjected to combined analysis of variance and, from this, the variance components for genotypes ( $\sigma^2_g$ ), environments ( $\sigma^2_a$ ) and genotype by environment interaction ( $\sigma^2_{g \times e}$ ) were estimated. Ten variables related to the dimensions of ear, grain and tassel structures presented repeatability values  $r = [\sigma^2_g / (\sigma^2_e + \sigma^2_{g \times e})]$  larger than 0.7, which were considered appropriate to study the agro-morphological diversity. Principal component and cluster analysis were performed with these variables. The first two principal components explained 68 % of the total variance. In the plane defined by the first two principal components, three groups were formed based on grain size and shape, mainly: 1) Chalqueño maize populations which were included as a different morphological reference; 2) typical Cacahuacintle populations (Calimaya, Techuchulco, and Amecameca, State of Mexico, and Serdán, Puebla, predominantly) and 3) variants of the Cacahuacintle type but with a smaller or less rounded kernel (Ixtenco, Tlaxcala; San Felipe, State of Mexico); this approach was consistent with grouping obtained by cluster analysis. Genetic diversity between Cacahuacintle populations is broader than previously known, with variants associated with geographic origin.

**Index words:** *Zea mays* L., Cacahuacintle, genetic diversity, highlands, populations.

#### INTRODUCCIÓN

En el continente americano se han descrito alrededor de 300 razas de maíz (Goodman y Brown, 1988; Serratos, 2009); en México se encuentra uno de los más grandes complejos de diversidad genética, que constituye el 22.7 % de la variación de esta especie (Pressoir y Berthaud, 2004); uno de los componentes de este enorme complejo de variación es el maíz Cacahuacintle; de acuerdo con Sánchez *et al.* (2000), constituye una de las cuatro razas de grano harinoso y presenta morfología específica; se caracteriza por poseer granos grandes, harinosos y de color blanco, aunque en ocasiones puede presentar

coloraciones rosa o azul (Wellhausen *et al.*, 1951). Cacahuacintle es considerado el maíz por excelencia para la preparación de pozole y consumo de elotes en los Valles Centrales de México y sus alrededores. Esta raza y sus variantes se cultivan en los estados de México, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Ciudad de México (CONABIO, 2020).

El maíz Cacahuacintle se cultiva en nichos ecológicos específicos en zonas del altiplano central de México, en altitudes superiores a 2,000 msnm; se han descrito formas típicas en el Estado de México (Wellhausen *et al.*, 1951) y en Puebla (Ortega *et al.*, 1991). En poblaciones de la región de Ciudad Serdán, Puebla se valoró su calidad para la preparación de pozole (Hernández *et al.*, 2014) y el rendimiento de poblaciones nativas del área de Toluca (González *et al.*, 2006).

La información fenotípica de esta raza es importante, ya que los procesos de selección son específicos, se busca conservar granos grandes con endospermo suave y con alta calidad para consumo como elote y para la elaboración de pozole, galletas, pinole y atole, entre otras formas comestibles (Fernández-Aulis *et al.*, 2019; Vázquez y Santiago, 2013). La comercialización de esta raza presenta dinámica específica en su principal nicho de consumo, el Valle de México; otras razas tienden a comercializarse en regiones muy específicas o son utilizadas para autoconsumo (Ortega, 2003).

La diversidad genética del maíz está constituida por complejos de múltiples variantes locales que satisfacen las necesidades culturales de los productores y agroecológicas de cada región (Anderson, 1946; Hernández, 1985; Pressoir y Berthaud, 2004). Los pequeños agricultores son protagonistas clave para preservar y acrecentar la adaptación específica y conservación de esta diversidad genética, dado que sus poblaciones continúan adaptándose mediante el flujo génico propiciado por el intercambio de semilla y por la recombinación genética, por ser el maíz una planta de polinización cruzada; mecanismos que contribuyen al proceso de evolución bajo domesticación de las poblaciones locales, cuya conexión generacional ocurre mediante la selección de semilla, una vez que las plantas expresaron sus atributos y el productor local procura privilegiar la descendencia de plantas con características deseables para el manejo del cultivo y el mejor aprovechamiento de sus productos (Cleveland y Soleri, 2007).

El planteamiento de estrategias eficaces y apropiadas para el desarrollo de las variantes agrícolas locales es limitado, debido en parte a que han predominado estudios desde la perspectiva de conocer los patrones raciales a nivel global; por lo tanto, se requieren mayores esfuerzos

para estudiar la diversidad dentro de la raza (Rocandio-Rodríguez *et al.*, 2014), así como reconocer la diversidad presente en microrregiones (Muñoz, 2005), ya que existe una amplia heterogeneidad ambiental, cultural y socioeconómica en la agricultura tradicional (Altieri, 1991).

Para promover la conservación *in situ* y el mejoramiento de los maíces nativos, con base en el patrimonio genético a nivel de microrregión, es indispensable conocer la diversidad de las poblaciones locales en las condiciones de la agricultura tradicional (Herrera-Cabrera *et al.*, 2004). Debido a que el maíz Cacahuacintle es uno de los granos más apreciados por los consumidores, los pequeños productores prefieren sembrar este maíz en lugar de híbridos de alto rendimiento, ya que pueden aumentar sus ingresos en casi 50 % al comercializarlo directamente en mercados especializados (Hellin *et al.*, 2013; Keleman *et al.*, 2013); además, contribuye al desarrollo de las comunidades a través de la revaloración de saberes locales agronómicos y culturales, por lo que se ha convertido en un elemento clave para el desarrollo e identidad de las comunidades agrícolas (Téllez-Silva *et al.*, 2016).

Dentro de la diversidad genética de maíces nativos de México, el Cacahuacintle es de baja frecuencia, siendo su distribución geográfica intermedia y su producción estable; es decir, su cultivo persiste de manera consistente (Ortega *et al.*, 1991; Perales y Golicher, 2011; Wellhausen *et al.*, 1951); por esta razón, resulta importante valorar la diversidad de la raza Cacahuacintle en sus distintas versiones eco-geográficas. El objetivo de la presente investigación fue estudiar la diversidad con base en características agro-morfológicas, de poblaciones de maíz Cacahuacintle, colectadas en los Valles Altos de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material genético

Para obtener una muestra representativa del maíz Cacahuacintle, se analizó el área de distribución geográfica de este maíz mediante la consulta de los datos pasaporte y sitios de colecta de accesiones en los bancos de germoplasma (CONABIO, 2015). La exploración y colecta se realizaron durante 2017 y 2018, en seis regiones del altiplano de México reconocidas por cultivar de manera predominante maíz Cacahuacintle dentro de su área de distribución: Techuchulco de Allende, Calimaya, San Felipe del Progreso y Amecameca de Juárez en el Estado de México; San Juan Bautista Ixtenco en Tlaxcala y Ciudad Serdán en el estado de Puebla. En cada localidad se colectaron de cinco a ocho poblaciones, con un mínimo de 30 mazorcas por productor donante, obteniendo 39 poblaciones (Cuadro 1). Se utilizaron cuatro poblaciones

**Cuadro 1. Poblaciones nativas de maíz Cacahuacintle colectadas en el Estado de México, Tlaxcala y Puebla en el periodo de 2017 a 2018.**

Población	Localidad	Estado	Lat. N	Long. O	Altitud (msnm)
TE-1	Techuchulco de Allende	Edo. México	19° 06' 33"	99° 31' 24"	2616
TE-2	Techuchulco de Allende	Edo. México	19° 06' 45"	99° 31' 13"	2588
TE-3	Techuchulco de Allende	Edo. México	19° 06' 43"	99° 31' 22"	2591
TE-4	Techuchulco de Allende	Edo. México	19° 06' 45"	99° 31' 13"	2588
TE-5	Techuchulco de Allende	Edo. México	19° 31' 30"	99° 31' 13"	2592
TE-6	Techuchulco de Allende	Edo. México	19° 07' 37"	99° 30' 15"	2620
IX-1	San Juan Bautista Ixtenco	Tlaxcala	19° 15' 01"	97° 53' 35"	2510
IX-2	San Juan Bautista Ixtenco	Tlaxcala	19° 15' 01"	97° 53' 35"	2510
IX-3	San Juan Bautista Ixtenco	Tlaxcala	19° 15' 01"	97° 53' 35"	2510
IX-4	San Juan Bautista Ixtenco	Tlaxcala	19° 15' 01"	97° 53' 35"	2510
IX-5	San Juan Bautista Ixtenco	Tlaxcala	19° 15' 01"	97° 53' 35"	2510
IX-6	San Juan Bautista Ixtenco	Tlaxcala	19° 15' 01"	97° 53' 35"	2510
CA-1	Calimaya de Díaz González	Edo. México	19° 10' 25"	99° 37' 02"	2600
CA-2	Calimaya de Díaz González	Edo. México	19° 10' 25"	99° 37' 02"	2700
CA-3	Calimaya de Díaz González	Edo. México	19° 10' 25"	99° 37' 02"	2700
CA-4	Calimaya de Díaz González	Edo. México	19° 10' 25"	99° 37' 02"	2600
CA-5	Calimaya de Díaz González	Edo. México	19° 10' 25"	99° 37' 02"	2700
CA-6	Calimaya de Díaz González	Edo. México	19° 10' 25"	99° 37' 02"	2600
CA-7	Calimaya de Díaz González	Edo. México	19° 10' 25"	99° 37' 02"	2600
CS-1	Ciudad Serdán	Puebla	18° 59' 38"	97° 24' 52"	2640
CS-2	Ciudad Serdán	Puebla	19° 06' 46"	97° 25' 04"	2615
CS-3	Ciudad Serdán	Puebla	19° 04' 12"	97° 25' 34"	2670
CS-4	Ciudad Serdán	Puebla	19° 06' 54"	97° 24' 52"	2624
CS-5	Ciudad Serdán	Puebla	19° 06' 47"	97° 25' 04"	2613
CS-6	Ciudad Serdán	Puebla	19° 06' 46"	97° 25' 04"	2615
CS-7	Ciudad Serdán	Puebla	18° 59' 36"	97° 24' 51"	2642
CS-8	Ciudad Serdán	Puebla	19° 04' 12"	97° 25' 34"	2670
SF-1	San Felipe del Progreso	Edo. México	19° 33' 33"	99° 58' 57"	2927
SF-2	San Felipe del Progreso	Edo. México	19° 32' 24"	99° 56' 31"	2964
SF-3	San Felipe del Progreso	Edo. México	19° 33' 13"	99° 58' 45"	3023
SF-4	San Felipe del Progreso	Edo. México	19° 33' 56"	99° 57' 08"	2964
SF-5	San Felipe del Progreso	Edo. México	19° 33' 23"	99° 57' 33"	2935
AM-1	Amecameca de Juárez	Edo. México	19° 04' 44.4"	98° 43' 53.3"	2641
AM-2	Amecameca de Juárez	Edo. México	19° 04' 32.5"	98° 44' 19.1"	2632
AM-3	Amecameca de Juárez	Edo. México	19° 04' 52.5"	98° 44' 15.3"	2633
AM-4	Amecameca de Juárez	Edo. México	19° 05' 09.2"	98° 44' 28.8"	2608
AM-5	Amecameca de Juárez	Edo. México	19° 05' 32.2"	98° 45' 49.2"	2525
AM-6	Amecameca de Juárez	Edo. México	19° 05' 34"	98° 45' 42.9"	2400
AM-7	Amecameca de Juárez	Edo. México	19° 05' 34"	98° 45' 42.9"	2400

de la raza Chalqueño (T-1 a T-4) como testigos.

### Ubicación de los experimentos

Se establecieron cuatro experimentos en campo en las localidades de Ayapango, Estado de México (primavera-verano 2018 y 2019) (19° 08' 11" N y 98° 48' 30" O a altitud de 2430 msnm, con temperatura media anual de 14.2 °C y precipitación media anual de 804.7 mm); Montecillo, Estado de México (primavera-verano 2019) (19° 28' 07" N y 98° 48' 54" O, a una altitud de 2245 msnm, con temperatura media anual de 17.2°C y precipitación media anual de 598.6 mm), e Ixtenco, Tlaxcala (primavera-verano 2019) (19° 15' 20" N y 97° 53' 26" O a altitud de 2459 msnm, con temperatura media anual de 13.9° C y precipitación media anual de 766.7 mm), de acuerdo con información obtenida del SMN (2020).

### Diseño experimental y manejo agronómico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en cada localidad de evaluación. La parcela experimental consistió de dos surcos de 5 m de longitud y 0.85 m de ancho. En la siembra se colocaron tres semillas cada 0.50 m; posteriormente, a la primera escarda se aclareo a dos plantas por mata para ajustar a una densidad de población aproximada de 47,000 plantas ha<sup>-1</sup>. Las poblaciones se evaluaron bajo condiciones de temporal en las evaluaciones establecidas en Ayapango e Ixtenco, mientras que en la evaluación de Montecillo se aplicaron cuatro riegos de auxilio durante el ciclo de cultivo. Se fertilizó con una sola aplicación usando la fórmula 120-80-00; no se realizó control de plagas y enfermedades. Las siembras se realizaron en Ayapango el 4 y 3 de mayo de 2018 y 2019, respectivamente. En Montecillo la siembra fue el 9 de mayo y en Ixtenco el 17 de mayo de 2019.

### Variables evaluadas

El registro de las variables agro-morfológicas se basó en los descriptores que presentan Sánchez *et al.* (1993) y Herrera-Cabrera *et al.* (2004).

Durante el ciclo de cultivo se obtuvo información de los días a floración masculina (DFM) como variable fenológica, ésta se determinó como el número de días a partir de la siembra hasta que más del 50 % de las plantas liberaron polen. La altura de la planta (APL) y de la mazorca (AMZ) en cm, se consideró desde el suelo hasta la hoja bandera y hasta el nudo de la primera mazorca respectivamente, evaluada después de la floración masculina.

En el periodo de llenado de grano y cercano a la madurez se cuantificaron las características de la inflorescencia masculina longitud total de la espiga (LTE), longitud del

pedúnculo (LPE), longitud de la parte ramificada (LRA), longitud de la espiga principal (LEP) en cm, número de ramas en la panícula (NRA) y número de espiguillas en 10 cm (NE).

En la cosecha se eligieron cuatro mazorcas por parcela que tuvieran competencia completa y estuvieran bien formadas; con ellas se realizó la evaluación de características de mazorca y grano que incluyeron: longitud de la mazorca (LMZ), diámetro de mazorca (DMZ), ambas en cm; peso de mazorca (PMZ), peso de olote (PO) en g; longitud de olote (LO), diámetro de olote (DO) en cm; número de hileras de la mazorca (NHM) y número de granos por hilera (NGH). En una muestra de 10 granos por mazorca se registró en mm el ancho de grano (ANG), longitud de grano (LGR), grosor de grano (GGR); se registró el peso total de grano de mazorca (PG), peso de 100 granos (PCG), ambos en g. Usando una probeta graduada se evaluó el peso volumétrico de 250 mL en gramos (PV) y volumen de 100 granos (VCG).

### Análisis estadístico

Con la información obtenida se realizó análisis de varianza combinado a través de localidades (Cuadro 2) con el paquete estadístico SAS® V.9.0. (SAS Institute, 2002), considerando el diseño experimental de bloques completos al azar y cuatro localidades de evaluación. Los componentes de la varianza se estimaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_g^2 = (\text{CMC} - \text{CMC} \times A) / ra$$

$$\sigma_a^2 = (\text{CMA} - \text{CMR}/A - \text{CMC} \times A + \text{CME}) / rc$$

$$\sigma_{g \times a}^2 = (\text{CMC} \times A - \text{CME}) / r$$

y con esos valores se estimó la repetibilidad (r) para cada variable:

$$r = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_a^2 + \sigma_{g \times a}^2}$$

Se seleccionaron 10 variables con valores de repetibilidad (r) mayores de 0.7 como más apropiadas para el estudio de la diversidad, por considerar una mayor relevancia de la variación genética (entre poblaciones), con respecto a la variación entre ambientes más la de interacción genotipo × ambiente (Goodman y Paterniani, 1969; Sánchez *et al.*, 1993).

Con los promedios de cada población de las 10 variables se realizaron análisis de componentes principales (CP) y de conglomerados usando el paquete Factoextra 1.0.7 y FactoMiner 2.4 en R (R Development Core Team,

**Cuadro 2. Estructura del análisis de varianza.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios (CM)	Esperanzas de CM
Ambientes (a)	a-1	CMA	$\sigma_e^2 + c\sigma_{r/a}^2 + r\sigma_{g \times a}^2 + rc\sigma_a^2$
Repeticiones (r)/Ambientes	a(r-1)	CMRA	$\sigma_e^2 + c\sigma_{r/a}^2$
Genotipos	c-1	CMG	$\sigma_e^2 + r\sigma_{g \times a}^2 + ra\sigma_g^2$
Genotipos × Ambientes	(c-1) (a-1)	CMG × A	$\sigma_e^2 + r\sigma_{g \times a}^2$
Error	a (c-1) (r-1)	CME	$\sigma_e^2$
Total corregido	arc-1		

CMA: cuadrados medios de ambientes, CMRA: cuadrados medios de repeticiones anidados en ambientes, CMG: cuadrados medios de genotipos (poblaciones + testigos), CMG × A: cuadrados medios de genotipos por ambientes, CME: cuadrado medio del error experimental,  $\sigma_e^2$ : componente de varianza del error,  $\sigma_{r/a}^2$ : componente de varianza de repeticiones anidadas en ambiente,  $\sigma_{g \times a}^2$ : componente de varianza de interacción entre genotipos y ambientes,  $\sigma_a^2$ : componente de varianza de ambientes,  $\sigma_g^2$ : componente de varianza de genotipos.

2012). Se graficó la dispersión de las poblaciones sobre el plano determinado por los dos primeros CP (biplot), y las correlaciones entre esos componentes y las variables originales. Para el análisis de conglomerados se usaron distancias euclidianas promedio y el método de agrupamiento UPGMA (Unweighted Pair-Group Method with Arithmetic Mean). Para conocer el grado de similitud entre las poblaciones se determinó el número óptimo de grupos mediante el método de *Elbow* (Fralely y Raftery, 1998; R Development Core Team, 2012).

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El maíz Cacahuacintle, junto con el Palomero Toluqueño, son las dos razas mexicanas que se cultivan a mayores altitudes, 2511 y 2651 msnm, respectivamente, en promedio de las accesiones correspondientes en los bancos de germoplasma (Perales y Golicher, 2011). En particular, la altitud promedio de los sitios de colecta de las poblaciones en este estudio fue de 2638 msnm, lo que indicaría que la distribución del Cacahuacintle puede ser más amplia de lo que se tiene representado en los bancos de germoplasma.

**Análisis de varianza**

En el análisis de varianza combinado (Cuadro 3) se detectaron diferencias estadísticas significativas entre las poblaciones ( $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$ ) para 24 variables, excepto para AMZ, lo cual indica variación entre las poblaciones de maíz Cacahuacintle de diferente origen geográfico. Estos resultados son semejantes a los obtenidos por González *et al.* (2006), quienes observaron diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) en 30 poblaciones de maíz Cacahuacintle del valle de Toluca, Estado de México.

Entre ambientes hubo diferencias estadísticas ( $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$ ) para 22 de los 24 caracteres morfológicos evaluados, lo cual indica variación entre las localidades de

evaluación debido a la condición agro-ecológica presente en cada localidad.

Para la interacción de los ambientes × poblaciones, en 14 de las 24 variables hubo significancia ( $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$ ); estos resultados difieren de los de González *et al.* (2006), quienes reportaron que sólo el número de hileras en la mazorca presentó significancia ( $P \leq 0.05$ ) para la interacción; sin embargo, los resultados de este estudio son similares a los de Rocandio-Rodríguez *et al.* (2014) y Herrera-Cabrera *et al.* (2013), quienes valoraron la variación agro-morfológica de maíces nativos de los Valles Altos, entre ellos algunas poblaciones de Cacahuacintle, observando significancia ( $P \leq 0.01$ ) para la interacción en la mayoría de sus variables. Estos resultados, en su conjunto, indican que las poblaciones manifiestan respuestas particulares a determinados ambientes, atribuibles a la variación entre poblaciones relacionadas con su origen geográfico y genético, lo cual implicaría que una buena estrategia para acrecentar el potencial agronómico del maíz local sería el mejoramiento participativo, y éste debiera tomar como base al patrimonio genético local de cada condición agro-ecológica (Muñoz, 2005).

**Características para valorar la diversidad agro-morfológica**

En el Cuadro 3 se presentan los estimadores de componentes de varianza de poblaciones ( $\sigma_g^2$ ), ambientes ( $\sigma_a^2$ ), interacción poblaciones × ambientes ( $\sigma_{g \times a}^2$ ) y coeficiente de repetibilidad  $r = [\sigma_g^2 / (\sigma_a^2 + \sigma_{g \times a}^2)]$  para las 24 variables. Considerando que valores de r indican estabilidad de los caracteres a través de las localidades de evaluación, se seleccionaron 10 variables con  $r \geq 0.7$ , de las cuales cuatro corresponden a variables de espiga (longitud de la espiga principal, número de ramas en la panícula, número de espiguillas en 10 cm de la espiga central, longitud total de la espiga), cinco del grano (grosor, ancho y longitud de grano, volumen de 100 granos, peso volumétrico) y una de

la mazorca (número de hileras), todas ellas consideradas como estructuras reproductivas masculina y femenina de la planta de maíz.

En general, es consistente a través de estudios de este tipo, la consideración de atributos relacionados con estructuras reproductivas. Mediante la aplicación de la repetibilidad ( $r$ ), Sánchez *et al.* (1993) recomendaron un mínimo de nueve características como variables apropiadas para la clasificación inter-racial de maíz; varias de ellas coinciden con las de esta investigación. En otros estudios, Herrera *et al.* (2000) presentaron una lista de 11 caracteres apropiados para clasificación intra-racial en 104 poblaciones de maíz de la raza Chalqueño, mientras que para Rocandio-Rodríguez *et al.* (2014) el número de variables para medir la diversidad inter-racial de un conjunto de siete razas fue de 13 y señalan que las variables que se consideran "apropiadas" son diferentes para cada caso específico. Mijangos-Cortés *et al.* (2007) enfatizan que cada estudio debe seleccionar su propio conjunto de caracteres, de acuerdo con la composición de la diversidad genética en estudio. Para este caso se determinaron 10 variables como las adecuadas para valorar la diversidad del maíz Cacahuacintle.

### Análisis de componentes principales

Los primeros dos CP explicaron el 48.2 y 19.8 % de la variación, respectivamente; es decir, explicaron el 68.0 % de la variación total. Las variables grosor de grano, ancho de grano, peso volumétrico, número de hileras en la mazorca y volumen de cien granos contribuyeron en mayor medida en la determinación del primer componente principal (CP1); las variables longitud de la espiga principal y longitud total de la espiga (cm) fueron las más relevantes en la determinación del segundo componente principal (CP2).

En la Figura 1 se observa la formación de tres grupos de poblaciones: 1) ubicado en el centro de los cuadrantes I y IV, se integra principalmente por poblaciones de Techuchulco, Calimaya, Ciudad Serdán y Amecameca, las cuales se caracterizan por presentar granos grandes (media de 14.1 y 6.2 mm para ANG y GGR respectivamente), consideradas como el grano típico descrito y reconocido como Cacahuacintle (CONABIO, 2015; Wellhausen *et al.*, 1951), la densidad de espiguillas en la espiga es menor (31.5) y el grupo presenta variación para longitud de panícula (desde 68 cm para CS-6 hasta 81.2 en CA-6). La predominancia de maíces de Techuchulco y Calimaya dentro del Grupo I puede tener relación con el reconocimiento del área con mayor tradición en el cultivo de este tipo de maíz (González *et al.*, 2006), ya que la mayoría de los agricultores consideran su semilla de origen ancestral (conservada a

través de generaciones) con baja frecuencia de movilidad desde fuera del área, y además se reconoce como fuente de semilla para localidades alejadas geográficamente (Herrera-Cabrera *et al.*, 2004).

Las poblaciones de maíz de la región de San Felipe, Estado de México, Ixtenco, Tlaxcala, y algunas de la región de Amecameca, Estado de México tuvieron convergencia en el Grupo II, y se caracterizaron por un menor tamaño del grano (media de 9 y 4.4 mm para ANG y GGR respectivamente) con respecto a las poblaciones del Grupo I, particularmente las poblaciones de San Felipe, fueron precoces (84 DFM) y de menor porte de planta (media de 195 cm APL y 117 cm AMZ), características asociadas con mazorcas y granos de menor tamaño, mientras que las poblaciones de Ixtenco y Amecameca (AM-1, AM-4) presentaron formas menos esféricas que los Cacahuacintles de Calimaya, Techuchulco y Ciudad Serdán; en este grupo la panícula es de menor longitud (71 vs 81 cm las panículas de mayor longitud) y densidad intermedia de espiguillas en la espiga (33.2), éstas poblaciones podrían ser formas recombinantes con otros tipos de maíz como Chalqueños o Cónicos. La variación observada entre los grupos también se atribuye al curso evolutivo normal de las poblaciones en cada microrregión, mediante prácticas de selección asociadas con el tipo de grano, ciclo biológico y rendimiento (Muñoz, 2005).

En el Grupo III se encuentra la población IX-6 y tres poblaciones de la raza Chalqueño, resultado similar a lo encontrado por Rocandio-Rodríguez *et al.* (2014), quienes al evaluar siete razas de los valles altos de México encontraron asociaciones entre la raza Cacahuacintle y Chalqueño, primordialmente debidas a la similitud de tamaño y peso del grano. Estas poblaciones de Chalqueño presentan grano de mayor longitud (19.9 mm) pero con menor grosor y anchura (4.2 mm GGR y 8.2 mm ANG), mazorcas con mayor número de hileras (17); este grupo presenta espigas densas (NE media de 39.5) y pocas ramas en la panícula (NRA media de 11.1), características típicas del grupo Cónico o Piramidal (Sánchez y Goodman, 1992) al que pertenece la raza Chalqueño, lo cual confirma la diferenciación entre ambos grupos genéticos; de igual manera, consideran al Cacahuacintle como un grupo que comparte características vegetativas con este grupo, como el caso de la población IX-6.

### Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados (Figura 2) muestra la diversidad genética dentro de la raza Cacahuacintle, con algunas precisiones sobre la continuidad que se observa en el análisis de CP (Figura 1), basado en la información de las características evaluadas.

**Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado, componentes de varianza y repetibilidad para 24 variables agro-morfológicas en 39 poblaciones de maíz Cacahuacintle. Ayapango, Edo., de Mex. 2018 y 2019, Montecillo, Edo. de Méx. 2019 e Ixtenco, Tlax. 2019.**

Variables	FV				CV (%)	$\sigma^2_g$	$\sigma^2_a$	$\sigma^2_{g \times a}$	r
	Amb	Gen	Amb × Gen	Error					
Grano									
GGR	13.12**	2.03**	0.2	0.19	7.95	0.15	0.10	0.00	1.39 <sup>†</sup>
ANG	32**	15.4**	1.85	1.8	11.84	1.13	0.24	0.02	4.18 <sup>†</sup>
LGR	148**	14.6**	2.64	3.02	12.18	1.00	1.11	-0.13	1.08 <sup>†</sup>
PCG	8635**	274.8**	85.34**	44.26	14.14	15.79	65.74	13.69	0.18
VCG	17,459**	1487.6**	166.46*	104.86	12.05	110.10	133.07	20.53	0.70 <sup>†</sup>
PV	50,589**	1056**	79.1**	69	5.77	81.41	391.50	3.37	1.87 <sup>†</sup>
PG	159,398**	4628.2**	836.32**	481	17.6	315.99	1218.47	118.44	0.23
Mazorca									
LO	240.93**	9.90**	2.92*	1.97	9.89	0.58	1.84	0.32	0.25
AO	11**	0.99**	0.24**	0.1	8.87	0.06	0.08	0.05	0.41
PO	3318**	147.4**	32.06**	12.77	20.41	9.61	25.37	6.43	0.27
LMZ	162.7**	8.8**	3.35	2.8	11.5	0.45	1.24	0.18	0.30
DMZ	27.6**	0.98**	0.3**	0.14	7.1	0.06	0.21	0.05	0.19
NHM	34.58**	21.17**	2.54	2.41	12.45	1.55	0.26	0.04	4.85 <sup>†</sup>
NGH	547.8**	32.5**	8.91	7.7	11.75	1.97	4.20	0.40	0.40
PMZ	187416**	5277.9**	1521.6*	801.3	18.13	313.1	1428.2	240.1	0.17
Planta									
APL	130,430**	4032.8**	844.74*	598.87	10.1	265.67	994.97	81.96	0.23
AMZ	83443**	2650.2	2463.6*	1880.2	31.16	15.55	634.09	194.47	0.02
DFM	2589**	184.5**	19.6**	8.12	3.02	13.74	19.71	3.83	0.54
Espiga									
LPE	521.7**	13.17*	11.35*	5.81	7.98	0.15	3.89	1.85	0.02
LEP	9.52	32.05**	3.1	2.78	4.96	2.41	0.02	0.11	1.61 <sup>†</sup>
NRA	176.33**	23.48**	5.96	4.22	20.65	1.46	1.15	0.58	8.11 <sup>†</sup>
NE	8.39	66.33**	7.3*	4.06	6.19	4.92	-0.03	1.08	3.09 <sup>†</sup>
LTE	0.44	59.9**	4.82	3.46	2.51	4.59	-0.06	0.45	7.40 <sup>†</sup>
LRA	102.6**	8.42**	5.54	3.91	22.81	0.24	0.68	0.54	0.11
GL	3	42	117	318					

FV: fuente de variación, Amb: ambientes, Gen: Genotipos, Amb × Gen: interacción entre ambientes y genotipos, Error: error experimental, CV: coeficiente de variación,  $\sigma^2_g$ : componente de varianza de genotipos,  $\sigma^2_a$ : componente de varianza de ambientes,  $\sigma^2_{g \times a}$ : componente de varianza de interacción entre genotipos y ambientes, r: repetibilidad, GGR: grosor de grano, LGR: longitud de grano, ANG: ancho de grano, PCG: peso de 100 granos, VCG: volumen de 100 granos, PV: peso volumétrico, PG: peso total de grano en la mazorca, LO: longitud de olote, DO: diámetro de olote, PO: peso de olote, LMZ: longitud de la mazorca, DMZ: diámetro de mazorca, NHM: número de hileras de la mazorca, NGH: número de granos por hilera, PMZ: peso de mazorca a humedad equilibrada al ambiente, APL: altura de la planta, AMZ: altura a la mazorca, DFM: días a floración masculina, LPE: longitud del pedúnculo, LEP: longitud de la espiga principal, NRA: número de ramas primarias, NE: número de espiguillas en 10 cm de la espiga central, LTE: longitud total de la espiga, LRA: longitud de la parte ramificada de la espiga, \* y \*\* diferencias significativas a  $P \leq 0.05$  y  $\leq 0.01$ , respectivamente, GL: grados de libertad. †Variables seleccionadas con  $r > 0.7$ . La FV Repeticiones en ambientes (no presentada) se usó como término de error para probar la significancia entre ambientes.

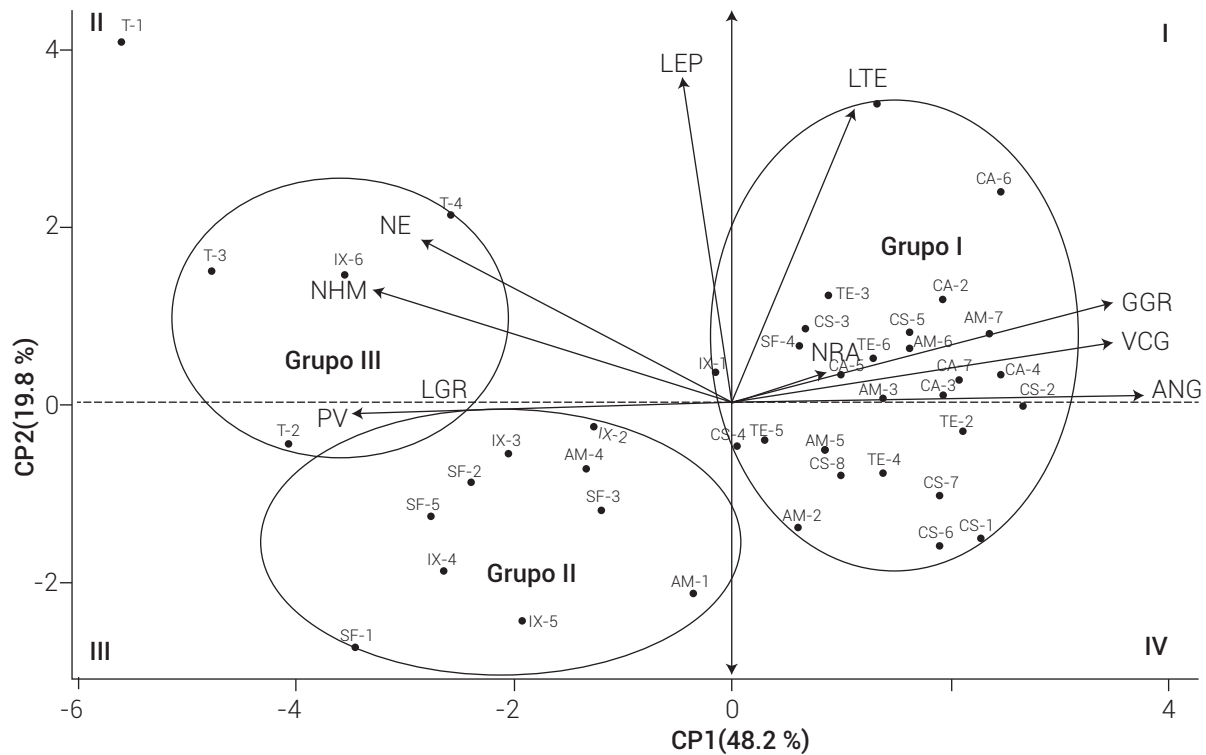


Figura 1. Dispersión de 39 poblaciones de maíz Cacahuacintle y 4 testigos raza Chalqueño en el plano de los dos primeros componentes principales. LTE: longitud total de la espiga, LEP: longitud de la espiga principal, NE: número de espiguillas en 10 cm, NHM: número de hileras de la mazorca, ANG: ancho de grano, LGR: longitud de grano, GGR: grosor de grano, PV: peso volumétrico, VCG: volumen de 100 granos, NRA: número de ramas en la panícula, CP1: primer componente principal, CP2: segundo componente principal.

El Grupo 1 está formado por 26 poblaciones que pudiera considerarse como de Cacahuacintle típico, se agrupan en función del tamaño de grano, con procedencia del Valle de Toluca (14), los Llanos de Serdán (7) y Amecameca (5), principalmente; estas áreas son reconocidas como productoras de maíz Cacahuacintle, que se comercializa a nivel nacional, con estándares en calidad de grano, como grano entero y grano despuntado para la preparación de pozole, y para consumo como elote (González *et al.*, 2006; Hernández *et al.*, 2014).

Los agricultores de las regiones de Techuchulco, Calimaya y Ciudad Serdán se han especializado en seleccionar granos de forma redonda globosa, tamaño grande y endospermo de textura completamente harinosa; estas características están fuertemente relacionadas con la calidad del pozole, principal destino de la producción de estas regiones (Bonifacio *et al.*, 2005). En este contexto, Aguilar *et al.* (1999) afirmaron que la forma en que el agricultor realiza la selección de semilla determina la homogeneidad fenotípica en las características de la mazorca y del grano que se observa en este grupo de poblaciones.

El Grupo 2 se encuentra constituido por tres de los testigos de la raza Chalqueño, los cuales se diferencian claramente del grupo de poblaciones de Cacahuacintle en la forma y textura del grano, así como mayor número de hileras (17 y 12 respectivamente). El Grupo 3 se encuentra constituido por poblaciones de San Felipe del Progreso (SF-1, SF-2, SF-5) cultivadas en altitudes superiores a 2900 msnm, presentan grano más pequeño que el de las poblaciones del Grupo 1 (media de 62 y 92 mL de VCG), plantas de menor altura (media 222 y 245 cm de APL) y más precoces (media 89 y 94 DFM). Las poblaciones de este grupo representan una versión extrema del Cacahuacintle, debido a las características anteriormente señaladas, las cuales contrastan con las del Grupo 1. Las poblaciones de Ixtenco se cultivan en altitudes de más de 2500 msnm y conforman el Grupo 4, junto a las poblaciones AM-1, AM-4, SF-3, CS-4 y T-4, esta última población es Chalqueño de grano azul que muestra similitudes con los Cacahuacintles en características de mazorca y grano (Herrera-Cabrera *et al.*, 2004; Rocandio-Rodríguez *et al.*, 2014); con respecto al Grupo 1, estas poblaciones presentan una reducción del grosor y tamaño de grano, pero presentan endospermo harinoso y PV semejante al Cacahuacintle típico.



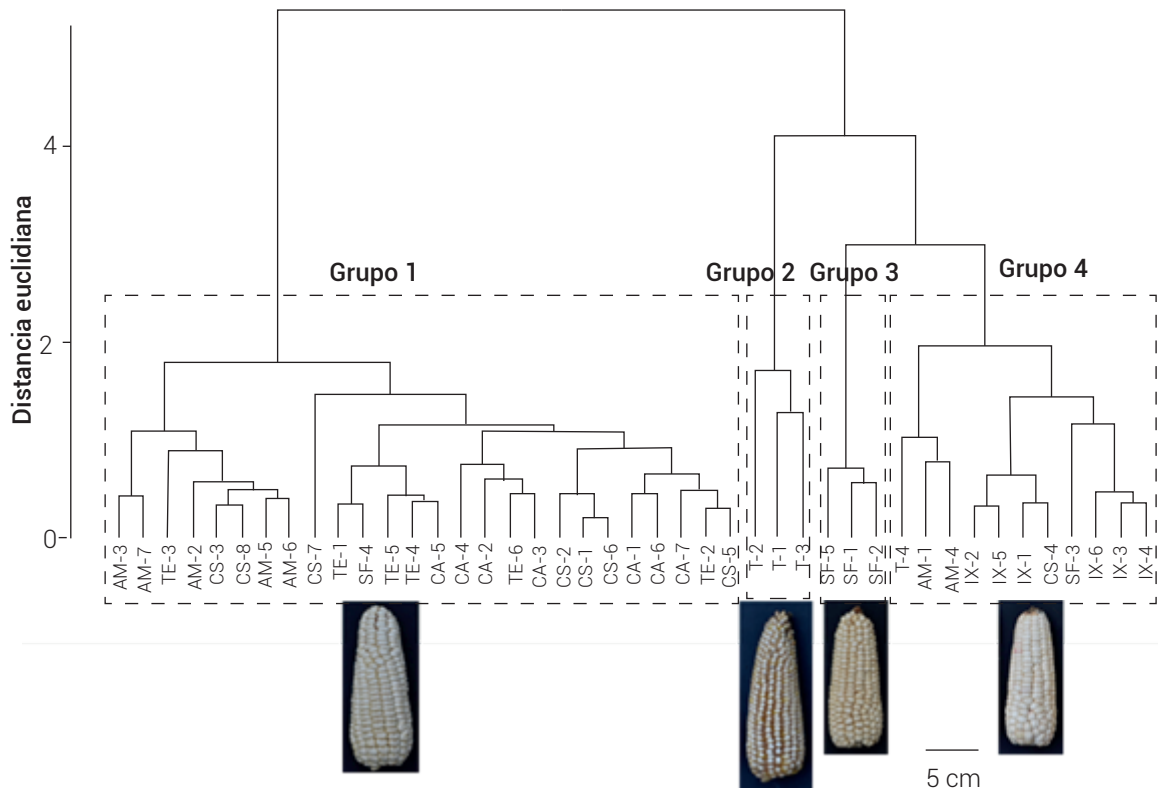


Figura 2. Dendrograma de 39 poblaciones de maíz Cacahuacintle y testigos de la raza Chalqueño, usando distancias euclidianas y construido con el método de agrupamiento UPGMA.

Para Herrera-Cabrera *et al.* (2004), variaciones de tamaño de grano y de las características reproductivas de la planta son posibles debido a la selección y al intercambio de semilla entre agricultores, por lo que es posible encontrar variantes de maíz Cacahuacintle, pero es notoria la asociación con condiciones ambientales específicas de origen. Las poblaciones de Cacahuacintle se siembran en nichos específicos (Hernández *et al.*, 2014); la selección de semilla por los productores junto con intercambios y movilización de semilla generan una dinámica y patrones de variación a través de nichos ambientales. Estas diferencias entre las poblaciones están relacionadas con la adaptación a un nicho ecológico y origen del material genético y podrían aprovecharse para acrecentar el mejoramiento genético *in situ* y *ex situ* del Cacahuacintle.

**CONCLUSIONES**

Las 39 poblaciones de maíz Cacahuacintle mostraron una amplia diversidad genética expresada en la variación agro-morfológica de los caracteres evaluados. Existen poblaciones con características típicas de maíz Cacahuacintle con origen en el Valle de Toluca, Amecameca, Estado de México y Ciudad Serdán, Puebla. Las poblaciones

de Ixtenco, Tlaxcala y San Felipe del Progreso, Estado de México, muestran variantes con formas intermedias en dimensiones y forma de grano, pero conservan la forma globosa y tipo de mazorca característica del maíz Cacahuacintle. La diversidad observada en las poblaciones estudiadas se atribuye a la influencia de factores ambientales y culturales predominantes en la agricultura tradicional, también diversos, con formas asociadas al origen geográfico, por lo que existen patrones de variación más amplios, que lo descrito para las poblaciones típicas de la raza. El análisis de la diversidad genética del maíz demanda estudios más completos para la descripción de las distintas variantes y los factores que las determinan.

**BIBLIOGRAFÍA**

Aguilar M. L. B., G. Calvo C., F. I. Nájera M., R. Serrato C., V. Landeros F., D. J. Pérez L., ... y A. González H. (1999) Agrobiodiversidad en la raza de maíz Cacahuacintle en Calimaya, México. *In: Seminario Internacional sobre Agrobiodiversidad Campesina*. 12-14 de mayo, 1999. C. Arriaga J. (ed). Centro de Investigación en Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México. pp:84-89.

Altieri M. A. (1991) How best can we use biodiversity in agroecosystems. *Outlook on Agriculture* 20:15-23, <https://doi.org/10.1177/003072709102000105>

Anderson E. (1946) Maize in Mexico a preliminary survey. *Annals*

- of the Missouri Botanical Garden 33:147-247, <https://doi.org/10.2307/2394428>
- Bonifacio V. E. I., Y. Salinas M., A. Ramos R. y A. Carrillo O. (2005) Calidad pozolera en colectas de maíz Cacahuacintle. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28:253-260.
- Cleveland D. A. and D. Soleri (2007) Extending Darwin's analogy: bridging differences in concepts of selection between farmers, biologists, and plant breeders. *Economic Botany* 61:121-136, [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2007\)61\[121:EDABD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2007)61[121:EDABD]2.0.CO;2)
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2015) Distribución de la raza de maíz Cacahuacintle (*Zea mays* subsp. *mays*) en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/cacah\\_1sgw.png](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/cacah_1sgw.png) (Marzo 2021).
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (2020) Proyecto global de maíces nativos. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. <http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/proyectoMaices.html> (Marzo 2021).
- Fernández-Aulis F., L. Hernández-Vázquez, G. Aguilar-Orsorio, D. Arrieta-Báez and A. Navarro-Ocaña (2019) Extraction and identification of anthocyanins in corn cob and husk from Cacahuacintle maize. *Journal of Food Science* 84:954-962, <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14589>
- Fraleigh C. and A. E. Raftery (1998) How many clusters? Which clustering method? Answers via model-based cluster analysis. *The Computer Journal* 41:578-588, <https://doi.org/10.1093/comjnl/41.8.578>
- González H. A., J. Sahagún C., D. J. Pérez L., A. Domínguez L., R. Serrato C., V. Landeros F. y E. Dorantes C. (2006) Diversidad fenotípica del maíz Cacahuacintle en el Valle de Toluca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29:255-261.
- Goodman M. M. and E. Paterniani (1969) The races of maize: III. Choices of appropriate characters for racial classification. *Economic Botany* 23:265-273, <https://doi.org/10.1007/BF02860459>
- Goodman M. M. and W. L. Brown (1988) Races of corn. In: Corn and Corn Improvement. 3rd edition. Agronomy Monograph No. 18. G. F. Sprague and J. W. Dudley (eds.). American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. pp:33-79.
- Hellin J., A. Keleman, D. López, L. Donnet y D. Flores (2013) La importancia de los nichos de mercado. Un estudio de caso del maíz azul y del maíz para pozole en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 6:315-328, <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.3-S3-A.315>
- Hernández X. E. (1985) Maize and the Greater Southwest. *Economic Botany* 39:416-430, <https://doi.org/10.1007/BF02858749>
- Hernández G. C. A., Y. Salinas M., P. A. López, A. Santacruz V., F. Castillo G. y T. Corona T. (2014) Calidad pozolera en poblaciones de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5:703-716, <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i4.932>
- Herrera C. B. E., F. Castillo G., J. J. Sánchez G., R. Ortega P. y M. M. Goodman (2000) Caracteres morfológicos para valorar la diversidad entre poblaciones de maíz en una región: caso la raza Chalqueño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23:335-354.
- Herrera-Cabrera B. E., F. Castillo-González, J. J. Sánchez-González, J. M. Hernández-Casillas, R. A. Ortega-Pazkca y M. M. Goodman (2004) Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia* 38:191-206.
- Herrera-Cabrera B. E., F. Castillo-González, R. A. Ortega-Pazkca y A. Delgado-Alvarado (2013) Poblaciones superiores de la diversidad de maíz en la región oriental del Estado de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36:33-43, <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.1.33>
- Keleman A., J. Hellin and D. Flores (2013) Diverse varieties and diverse markets: scale-related maize "profitability crossover" in the central Mexican Highlands. *Human Ecology* 41:683-705, <https://doi.org/10.1007/s10745-013-9566-z>
- Mijangos-Cortés J. O., T. Corona-Torres, D. Espinosa-Victoria, A. Muñoz-Orozco, J. Romero-Peñaloza and A. Santacruz-Varela (2007) Differentiation among maize (*Zea mays* L.) landraces from the Tarasca Mountain Chain, Mexico and the Chalqueño complex. *Genetic Resources and Crop Evolution* 54:309-325, <https://doi.org/10.1007/s10722-005-4775-y>
- Muñoz O. A. (2005) Centli Maíz. 2a edición. Editorial América. Ciudad de México, México. 210 p.
- Ortega P. R. (2003) La diversidad del maíz en México. In: Sin Maíz no Hay País. G. Esteva y C. Marielle (eds). CONACULTA. México, D. F. pp:123-154.
- Ortega P. R., J. Sánchez G., F. Castillo G. y J. M. Hernández C. (1991) Estado actual de los estudios sobre maíces nativos de México. In: Avances en el Estudio de los Recursos Fitogenéticos de México. R. Ortega P., G. Palomino H., F. Castillo G., V. A. González H. y M. Livera M. (eds.). Sociedad Mexicana de Fitogenética, A. C. Chapingo, Estado de México, México. pp:161-185.
- Perales R. H. y D. Golicher (2011) Modelos de distribución para las razas de maíz en México y propuesta de centros de diversidad y de provincias bioculturales. CONABIO. Ciudad de México. [https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/genes/files/Informe\\_completo\\_apendices.pdf](https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/genes/files/Informe_completo_apendices.pdf) (Marzo 2021).
- Pressoir G. and J. Berthaud (2004) Population structure and strong divergent selection shape phenotypic diversification in maize landraces. *Heredity* 92:95-101, <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800388>
- R Development Core Team (2012) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (Enero 2020).
- Rocandío-Rodríguez M., A. Santacruz-Varela, L. Córdova-Téllez, H. López-Sánchez, F. Castillo-González, R. Lobato-Ortiz, ... y R. Ortega-Pazkca (2014) Caracterización morfológica y agronómica de siete razas de maíz de los valles altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37:351-361, <https://doi.org/10.35196/rfm.2014.4.351>
- Sánchez G. J. J. and M. M. Goodman (1992) Relationships among the Mexican races of maize. *Economic Botany* 46:72-85, <https://doi.org/10.1007/BF02985256>
- Sánchez G. J. J., M. M. Goodman and O. Rawlings (1993) Appropriate characters for racial classification in maize. *Economic Botany* 47:44-59, <https://doi.org/10.1007/BF02862205>
- Sánchez G. J. J., M. M. Goodman and C. W. Stuber (2000) Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54:43-59, <https://doi.org/10.1007/BF02866599>
- SAS Institute (2002) SAS/STAT User's Guide, Software version 9.0. SAS Institute. Cary, North Carolina, USA. 4424 p.
- Serratos H. J. A. (2009) El Origen y la Diversidad del Maíz en el Continente Americano. Greenpeace. Ciudad de México, México. 33 p.
- SMN, Servicio Meteorológico Nacional (2020) ERIC III. Extractor Rápido de Información Climatológica Base CLICOM. V. 2.0. Servicio Meteorológico Nacional. CDMX, México.
- Téllez-Silva J. M., F. Herrera-Tapia, I. Vizcarra-Bordí y J. J. Ramírez-Hernández (2016) El maíz Cacahuacintle y su potencial para el desarrollo endógeno: el caso de Santa María Nativitas. *Especialidades. Revista de Temas Contemporáneos sobre Lugares, Política y Cultura* 6:167-191.
- Vázquez C. M. G. y D. Santiago R. (2013) Características fisicoquímicas y calidad del pozole del maíz Cacahuacintle procesado mediante tres métodos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36:357-366, <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.3-S3-A.357>
- Wellhausen E. J., L. M. Roberts y E. Hernández X. (1951) Razas de maíz en México: su origen, características y distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales, Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D. F. 237 p.