

Comparación de dulzura en maíz elotero con diferente fondo genético e incorporación del gen *shrunken2*

Alexander López-Hernández¹
Leobigildo Córdova-Téllez¹
Amalio Santacruz-Varela^{1§}
J. Jesús García-Zavala¹

¹Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. Tel. 595 8045900. (alexander.lopez.fito@gmail.com; lcordova@colpos.mx; zavala@colpos.mx).

§Autor para correspondencia: asvarela@colpos.mx

Resumen

La producción de elote superdulce en México se centra en el uso de híbridos comerciales, pues no existen razas nativas con esta característica, por esta razón se planteó la siguiente investigación con los objetivos: a) introducir un gen de dulzura en poblaciones nativas eloterías; y b) determinar su efecto sobre características agronómicas, calidad y aceptación por parte del consumidor. Se utilizaron las colectas nativas de maíz elotero: C-Pue-185 (Cacahuacintle), Hgo-428 (Chalqueño) y Hgo-416 (Elotes cónicos) infiltradas con el gen *shrunken2* (*sh2*) y con diferentes proporciones de fondo genético de maíz nativo, como testigos se utilizaron los híbridos comerciales A7573, Cherokee y Sweeter93. Se establecieron experimentos en las localidades de Montecillo, Texcoco, Estado de México y San Felipe, Teotlalcingo, Puebla, en el año 2021, usando un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se registraron características morfológicas, de rendimiento y una prueba sensorial. La población Hgo-428sh2F1 con fondo genético 50% nativo + 50% superdulce fue la mejor en cuanto a sólidos solubles totales (SST) con 16.5 °Brix. En la prueba sensorial sobresalió la misma población Hgo-428sh2BC1F1, con fondo genético 75% nativo + 25% superdulce. Se identificó a la población formada por Hgo-428 (Chalqueño) como sobresaliente en sólidos solubles totales y sabor de elote. El híbrido comercial A7573 destacó en características morfológicas. Las poblaciones nativas originales Hgo-428 (Chalqueño) y C-Pue-185 (Cacahuacintle) fueron iguales al mejor testigo comercial A7573 en cuanto a rendimiento de grano fresco rebanado (RGFR). La incorporación del gen superdulce (*sh2*) afectó de manera negativa todas las características evaluadas.

Palabras clave: *Zea mays* L, gen *shrunken2*, razas nativas.

Recibido: febrero de 2023

Aceptado: abril de 2023

Introducción

Dentro de la diversidad genética del maíz (*Zea mays* L.) existen los eloteros de granos dulces, considerados como hortaliza, debido a los cuidados intensivos que requieren y el valor agregado que poseen. Las diferentes variedades de maíz dulce varían en gran medida en sabor, textura y nutrición (Yang *et al.*, 2021). Actualmente, el maíz dulce es difundido en diversos países y destinado exclusivamente para el consumo humano, ya sea en fresco como elote o procesado industrialmente como conservas (Enciso *et al.*, 2012), además, en la ciencia de alimentos se investiga para el uso de queso análogo para untar (Aini *et al.*, 2019), extractos para cocinar y bebidas con altos niveles de carbohidratos y proteínas (Revilla *et al.*, 2021).

La principal diferencia entre el maíz dulce y los maíces no dulces es que el primero posee un gen recesivo presente en su genoma, cuya función es retardar o impedir la completa transformación del azúcar del grano en almidón (Montoro y Ruiz, 2017), por esta razón, el maíz homocigótico para este gen presenta mayor concentración de azúcar cuando se consume en fresco (Revilla *et al.*, 2021). En el presente trabajo se empleó germoplasma nativo que es utilizado para la producción de elotes en los valles altos de México: Elotes Cónicos, Chalqueño y Cacahuacintle (Sierra-Macías *et al.*, 2016), estas poblaciones con frecuencia se utilizan en el centro de México para dicho propósito, lo que representa una oportunidad para seleccionar la mejor población nativa sobresaliente para producción de elote (Ortiz-Torres *et al.*, 2013).

Esta investigación consistió en introducir un gen de dulzura en poblaciones nativas de uso elotero y determinar su efecto sobre características agronómicas, de calidad y aceptación por parte del consumidor, con el fin de aumentar su valor en beneficio de los productores y los consumidores, al proporcionar a los agricultores la oportunidad de sembrar elotes superdulces como una alternativa de producción.

Materiales y métodos

Material genético

Se utilizaron tres colectas de maíz elotero de valles altos: Cacahuacintle (C-Pue-185), Chalqueño (Hgo-428) y Elotes cónicos (Hgo-416) (Cuadro 1), a las cuales se les incorporó el gen *shrunken2* (*sh2*) como se describe a continuación: se utilizó una la población segregante línea mencionar nombre *Shrunken-2 Hi sh2 SYN 2k* del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) como donadora del gen *sh2* y este genotipo se cruzó manualmente con las tres razas de maíces de Valles Altos de México en primavera-verano (PV) del año 2016.

Cuadro 1. Materiales genéticos de maíz utilizados para la evaluación.

Raza	Colecta/nombre comercial/genealogía	Fondo genético	Color	Textura de endospermo
Cacahuacintle	C-Pue-185	100% Nativo	Blanco	Harinoso
	C-Pue-185sh ₂ F ₁	50% Nativo + 50% Dulce		
	C-Pue-185sh ₂ BC ₁ F ₁	75% Nativo + 25% Dulce		

Raza	Colecta/nombre comercial/genealogía	Fondo genético	Color	Textura de endospermo
Elotes cónicos	Hgo-416	100% Nativo	Azul	Semi-Cristalino
	Hgo-416sh ₂ F ₁	50% Nativo + 50% Dulce		
	Hgo-416sh ₂ BC ₁ F ₁	75% Nativo + 25% Dulce		
Chalqueño	Hgo-428	100% Nativo	Blanco crema	Semi-dentado
	Hgo-428sh ₂ F ₁	50% Nativo + 50% Dulce		
	Hgo-428sh ₂ BC ₁ F ₁	75% Nativo + 25% Dulce		
Testigos	A7573	100% Normal	Blanco	Dentado
	Cherokee	100% Normal	Blanco	Semi-cristalino
	Golden Sweetener 93	100% Súper dulce	Amarillo	Dulce

La siembra se realizó en dos fechas: en la primera fecha se sembraron las tres poblaciones y el donador, a los cinco días posteriores se sembró una segunda fecha del donador para asegurar sincronía floral. Debido a que el gen sh₂ se expresa en condición homocigótica recesiva, en PV de 2017 se realizaron autofecundaciones de plantas F₁ para detectar en la F₂ mazorcas con granos dulces.

En PV 2018 se sembraron los fenotipos dulces (F₂) de cada una de las cruza F₁ para realizar la primera retrocruza (BC₁) hacia las poblaciones recurrentes. En PV del año 2020 se sembraron y autofecundaron las plantas F₁ obtenidas en el año 2016, con fondo genético 50% recurrente + 50% del donador y las cruza F₁ obtenidas en el año 2018, resultado de la primera retrocruza BC₁, con fondo genético 75% recurrente + 25% del donador para identificar nuevamente los genotipos dulces. En el año 2021 se sembró la F₂:3 más tres híbridos comerciales eloteros como testigos.

Sitios experimentales

Los experimentos se establecieron el 14 de mayo del año 2021 en la localidad de San Felipe Teotlalcingo, Puebla, México (19° 13' 48" latitud norte y 98° 31' 07" longitud oeste a 2 400 m), de clima tipo C (w₁) (w)(x') s, semifrío subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual entre 5 y 12 °C precipitación media anual de 900 mm y el 25 de mayo del mismo año en Montecillo, Texcoco, Estado de México. (19° 28' 02" latitud norte y 98° 54' 24" longitud oeste a 2 250 m), de clima tipo Cb (w₀) (w) (i') g, templado con verano fresco largo, temperatura media anual entre 12 y 18 °C y precipitación media anual de 637 mm (García, 1998).

Diseño y unidad experimental

El diseño experimental fue en bloques completos al azar con tres repeticiones y la unidad experimental en una parcela de seis surcos de 5 m de longitud y 0.8 m de separación, con 11 matas de dos semillas a una distancia de 0.5 m entre ellas para los materiales de grano normal, y 11 matas con cuatro semillas a una distancia de 0.5 m entre ellas para los genotipos con el gen sh₂ para prevenir fallas en la germinación, por la condición física y fisiológica desfavorable propia de los genotipos con endospermo dulce.

Manejo de los experimentos

La siembra se realizó de manera manual, en la etapa V3 se raleó a dos plantas por mata, lo cual redujo la densidad de población a 50 000 plantas ha⁻¹. La fertilización se realizó antes de la siembra con la siguiente fórmula: 180N-60P-0K, se aplicó la mitad de nitrógeno y todo el fósforo en la siembra y el resto del nitrógeno a los 45 días después de la siembra. Las fuentes fueron urea y fosfato diamónico. El control de maleza se realizó con Atrazina a dosis de 2 kg ha⁻¹ en 200 L de agua, y Dicamba + Atrazina a dosis de 2 L ha⁻¹ en 300 L de agua.

Se presentó la plaga de frailecillo (*Macrodactylus* sp.) la cual se controló con Clorantraniliprole + Lambdacialotrina a dosis de 100 ml ha⁻¹ en 200 L de agua. Los experimentos se condujeron bajo riego. La cosecha se realizó manualmente a los 28 días después de la floración femenina, siete días después de lo recomendado por (Shelton y Tracy, 2015).

Variables evaluadas

Se registró vigor de planta (VIG) mediante una calificación visual con escala de 1 al 9, donde 1 corresponde a las plantas menos vigorosas y 9 a las plantas más vigorosas; floración femenina (FF, días) como el número de días transcurridos desde la fecha de siembra hasta que 50% de la población mostró la emergencia de los estigmas receptivos de aproximadamente 2 o 3 cm de largo en el jilote principal, altura de elote (AE, cm) se midió en una planta representativa de la unidad experimental como la distancia desde la base hasta el nudo de inserción de la mazorca principal.

De cinco elotes provenientes de plantas con competencia completa, se removieron todas sus brácteas y se registraron los siguientes datos: longitud de elote (LE, cm) se midió desde la parte basal del elote hasta la parte apical, llenado de granos (LLMZ, cm) se midió desde la parte basal del elote hasta llegar a la parte ocupada con granos, sin considerar granos abortados, sólo los granos que se encontraban en anillos completos alrededor de la mazorca, diámetro de elote (DE, cm).

Se midió en la parte media con un vernier digital (Mitutoyo CD-6 CS; Miyutoyo Corporation, Kanagawa, Japón), conteo del número de hileras (NH), se dividió la estructura femenina y se utilizó la mitad de la parte basal para llevar a cabo el conteo de las hileras de la mazorca, rendimiento de elote sin hojas (RESH, t ha⁻¹) se determinó al momento de la cosecha con una balanza digital (Ohaus, Scout Pro, Ohaus Corporation, Parsippany, New Jersey, USA), rendimiento de grano fresco rebanado (RGFR, t ha⁻¹), para ello, se separó de la mazorca y se rebanó manualmente con cuchillo, luego se pesó en una balanza digital marca Ohaus Scout Pro.

Los datos de RESH y RGFR se ajustaron al contenido de humedad de 70% (Rice y Tracy, 2013; Meneses *et al.*, 2017) y a una densidad de 50 000 elotes ha⁻¹ (piezas potencialmente comercializables), sólidos solubles totales (SST, °Brix) se obtuvo un extracto de la mezcla homogénea de granos rebanados de 20 elotes en estado de consumo cosechados por la mañana. La determinación se realizó por triplicado con un refractómetro digital (Atago Pal-1[®], Tokio, Japón) en 300 µl del extracto fresco.

Prueba sensorial (SE)

En la prueba sensorial se aplicó la metodología para estudiar el gusto y preferencia de los consumidores planteada por Severiano (2019), ante un panel no entrenado de 25 personas (mujeres y hombres de tres grupos de edades, < 30, 30-50 y > 50 años). El elote se preparó mediante cocción de 0.5 kg de grano en etapa de consumo (esquite) de cada unidad experimental. La cocción se realizó inmediatamente después de la cosecha con agua simple embotellada por 1 h en una olla de acero vitrificado novacero, 22 cm de 5 L (CINSA) y una parrilla eléctrica de 60 hz, 1 700 w, 127 v (Timco, PE-02, México) con el mismo nivel de regulación.

Las muestras fueron presentadas al grupo de panelistas a temperatura típica de consumo ($\approx 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) en vasos de plástico de 30 ml con 20 g de elote cocido. El orden de degustación de las muestras para cada persona fue aleatorio y entre la evaluación de cada muestra los panelistas consumieron agua simple embotellada para lavar lengua y paladar.

A cada muestra se le evaluó el sabor en una escala hedónica de nueve puntos, donde 9 representó me gusta muchísimo, 8 me gusta mucho, 7 me gusta bastante, 6 me gusta ligeramente, 5 me es indiferente, 4 me disgusta ligeramente, 3 me disgusta bastante, 2 me disgusta mucho y 1 me disgusta muchísimo (Paucar-Menacho *et al.*, 2016), con la variante de que se utilizó una escala gráfica lineal de nueve puntos en la que los panelistas marcaban en la línea un punto o diagonal al nivel de preferencia de la muestra, después se midió con una regla y se registró el valor de dicha marca.

Análisis estadístico

A cada variable se efectuó análisis de varianza general combinado. Para identificar las mejores poblaciones se llevó a cabo una comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) y se calculó la matriz de correlaciones de Pearson entre las variables evaluadas. Todos los análisis de datos se realizaron con el paquete estadístico SAS[®] 8.0 (SAS Institute, 1999).

Resultados y discusión

Análisis de varianza combinado

En la fuente de variación localidades se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.01$) para las variables vigor de planta (VIG), floración femenina (FF), altura de elote (AE), diámetro de elote (DE), rendimiento de elote sin hojas (RESH), rendimiento de grano fresco rebanado (RGFR) y sólidos solubles totales (SST) (Cuadro 2). Lo anterior indica que las localidades de evaluación discriminan de manera diferente y se atribuye a que son divergentes en cuanto a condiciones climáticas, edáficas, ubicación geográfica y la conducción de los experimentos, particularmente en cada una de ellas.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado de maíces eloteros evaluados en dos localidades.

FV	GL	VIG (1-9)	FF (d)	AE (cm)	LE (cm)	LLMZ (cm)	DE (mm)	NH	RESH (t ha ⁻¹)	RGFR (t ha ⁻¹)	SST (°brix)	SE
Loc (L)	1	4.5 **	1845.32**	18915.12**	0.67 ns	0.02ns	81.19**	0.55 ns	46.81 **	13.56 **	20.23 **	0.007ns
Rep/Loc	4	0.95 ns	0.57 ns	64.33ns	1.8 ns	1.39ns	2.97 ns	0.38 ns	0.65 ns	0.32 ns	0.48 ns	0.52ns
Gen (G)	11	26.87**	181.54**	6178.45**	21.77**	29.7**	68.86**	23.55**	40.24 **	8.13 **	44.64 **	3.41 **
G × L	11	1.37 **	5 **	275.15 **	1.79*	2.89**	2.79 ns	0.91 ns	1.68 **	0.63 **	1.84 **	0.54 *
Error	44	0.42	1.51	100.28	0.81	0.95	2.23	0.74	0.51	0.21	0.36	0.21
CV (%)		12.26	1.24	14.93	4.92	6.76	3.53	6.99	8.86	11.50	4.91	9.46

FV= fuente de variación; GL= grados de libertad; VIG= vigor de planta; FF= floración femenina; AE= altura de elote; LE= longitud de elote; LLMZ= llenado de mazorca; DE= diámetro de elote; NH: número de hileras; RESH= rendimiento de elote sin hojas; RGFR= rendimiento de grano fresco rebanado; SST= sólidos solubles totales; SE= sabor de elote; * y **= significancia estadística con $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$, respectivamente, ns= no significativo.

En la fuente de variación genotipos se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.01$) para todas las variables, lo cual significa que al menos uno de ellos es diferente del resto de los genotipos; por lo tanto, existe variabilidad entre los mismos, las diferencias encontradas se atribuyen en gran medida a la diversidad genética que presentan las poblaciones experimentales, pues se involucraron razas diferentes, así como al fondo genético producto de las cruces realizadas para la formación de las poblaciones evaluadas, así mismo la presencia del gen Sh2, el cual tiene marcada influencia en la expresión fenotípica de los materiales.

Con respecto a la interacción genotipos por localidades, se detectó significancia estadística ($p \leq 0.01$) para la mayoría de las variables, de lo cual se deduce que existen diferencias relativas entre el comportamiento de los genotipos a través de localidades; es decir, existe comportamiento desigual de las poblaciones experimentales al pasar de un ambiente a otro. Para las variables DE y NH no se encontró significancia estadística, indicando ausencia de interacción con los ambientes.

En este estudio se detectó variabilidad genética en las poblaciones evaluadas, lo que permite realizar selección de las mejores de acuerdo con sus buenos atributos agronómicos y estabilidad a través de ambientes; no obstante, para este último caso es necesario recurrir a metodologías que exploren, cuantifiquen e interpreten dicha interacción. Esto resulta importante para evitar desarrollar programas específicos para cada ambiente, cuando la calidad elotera del maíz se ve altamente afectada por el ambiente.

Selección de genotipos sobresalientes

Las lecturas de sólidos solubles totales (SST) variaron de 8.83 a 16.53 °Brix (Cuadro 3), la población Hgo-428sh2F1 destacó con fondo genético 50% nativo + 50% donador con 16.53 °Brix. El valor más bajo fue para la población elotera normal Hgo-416 (Elotes Cónicos), con 8.83 °Brix, esto coincide con los resultados obtenidos por Coutiño *et al.* (2015) con la variedad nativa Paloma en Villaflores Chiapas (8.8 °Brix).

Cuadro 3. Medias de genotipos y testigos comerciales para variables morfológicas y calidad de elote.

Genotipo	Calidad		Morfológicas							Rendimiento	
	SST (°Brix)	SE	VIG (1-9)	FF (d)	AE (cm)	LE (cm)	LLMZ (cm)	DE (cm)	NH	RESH (t ha ⁻¹)	RGFR (t ha ⁻¹)
Hgo-428sh2F ₁	16.53a	5.97ab	5c	100.5c	46.5ef	16.25e	11.81d	39.1e-g	12.13 b-d	6fg	3.07de
Hgo-428sh2BC ₁ F ₁	14.74b	6.08a	2.5f	102.16bc	64.33de	17.71 c-e	13.83bc	40.72 d-f	11.86 b-d	6.14fg	3.42d
Hgo-416sh2BC ₁ F ₁	14.35bc	4.79cb	3.5d-f	100.16c	58.83de	16.05e	11.22d	37.79fg	9.03f	5.16g	2.4e
C-Pue-185sh2BC ₁ F ₁	14.02bc	5.68ab	2.66ef	99.83c	56.5de	17.25de	13.15cd	42.33cd	11.31 c-e	7.43ef	3.63cd
Sweeter 93	13.96bc	4.79cb	4.66cd	99.83c	45.16ef	16.83e	12.60cd	41.02de	12.95bc	6.51fg	3.17de
Hgo-416sh2F ₁	13.81bc	5.93ab	4cd	95d	22.33g	18.89 b-d	15.45ab	42.16cd	14.83a	8.28de	4.66b
Hgo-428(Chalqueño)	13.44 c	4.96 a-c	3.83 c-e	100.4c	34fg	16.62e	12.32cd	37.39g	10.58 d-f	5.23g	2.43e
A 7573	10.7d	4.21cd	6.83b	103.66b	135.5a	19.83b	15.91a	44.25bc	12.46bc	9.02cd	5.13ab
Cherokee	9.37e	3.94cd	8ab	108.5a	68.5d	22.45a	17.26a	48.77a	15a	13.82a	5.92a
C-Pue-185 (Cacahuacintle)	9.13e	3.11d	8.16a	89.33e	71.66cd	19.5bc	17.26a	45.67b	15.2 a	10.83b	4.74b
Hgo-416 (Elotes Cónicos)	8.95e	4.37c	7.66ba	94.16d	110.33b	19.82b	16.8a	45.5b	13.06b	10.25bc	5.33ab
DHS	8.83e	4.34c	7.16ab	90.5e	90.83bc	19.08bc	16.05a	42.73 b-d	10ef	8.25de	4.42bc
	1.2	1.18	1.3	2.45	19.84	1.79	1.94	2.97	1.72	1.42	0.92

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). SST= sólidos solubles totales; SE= sabor de elote; VIG= vigor de planta; FF= floración femenina; AE= altura de elote; LE= longitud de elote; LLMZ= llenado de elote; DE= diámetro de elote; NH= número de hileras; RESH= rendimiento de elote sin hoja; RGFR= rendimiento de grano fresco rebanado. DHS= diferencia honesta significativa.

En sabor de elote (SE) sobresalió la misma población, pero con diferente fondo genético; es decir, 75% nativo + 25% donador, por lo que se deduce que en relación con la calidad de elote la población Hgo-428 (Chalqueño) puede ser un buen candidato en la comercialización de elote con el gen super dulce. En características morfológicas, los genotipos no dulces A7573, AS-Cherokee, Hgo-428 (Chalqueño), C-Pue-185 (Cacahuacintle), Hgo-416 (Elotes Cónicos) sobresalieron en todos los aspectos.

Destacó el híbrido comercial A7573 en la mayoría de las variables como VIG, FF, LE, LLMZ, DE y NH. En una investigación similar, Sánchez *et al.* (2013) encontraron también al híbrido A7573 como genotipo sobresaliente en longitud y diámetro de elote en dos ensayos en la zona del trópico húmedo para producción de elote; además, mencionaron que, en estudios realizados por otros autores, para el híbrido A-7573, en condiciones de riego, se registraron longitudes de elote entre 24 y 31 cm y diámetros de 4.1 a 5.5 cm, valores muy cercanos a los obtenidos en esta investigación. Con respecto al rendimiento de grano fresco rebanado, las poblaciones nativas normales Hgo-428 (Chalqueño) y C-Pue-185 (Cacahuacintle) fueron estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$) al testigo

comercial A7573 y numéricamente superiores a Sweeter 93. Zaluski *et al.* (2021) consideraron el rendimiento de grano, el rendimiento de mazorcas deshojadas y el número de mazorcas comerciales como caracteres clave para la identificación de genotipos de maíces superdulces prometedores. Valdivia-Bernal *et al.* (2010) encontraron que el criollo Jala fue sobresaliente en rendimiento de elote en comparación con el híbrido A7573.

Lo anterior alienta a seguir realizando esfuerzos en el proceso de retrocruzas para recuperar las características de las poblaciones iniciales, pero con la variante del gen de dulzura incorporada. En sabor de elote, el mejor material, de acuerdo con los panelistas, fue Hgo-428sh2BC1F1, seguido de Hgo-428sh2F1, Sweeter 93 y C-Pue185sh2BC1F1, materiales que están dentro del grupo de superdulces, con valores de sabor de elote de 6.08, 5.97, 5.93 y 5.68, respetivamente.

Correlaciones de Pearson

Los pares de variables LLMZ vs LE, RESH vs LE, DE y RGFR vs LLMZ, DE, RESH presentaron correlaciones positivas, estadísticamente significativas ($p \leq 0.01$), con valores de $r > 0.8$, Cuadro 4. Entre más cercano a 1 sea el coeficiente de correlación entre variables, mayor asociación entre ellas, aunque ello no implica necesariamente relaciones de causalidad (Roy-García *et al.*, 2019). Si se pretende comercializar el elote en pieza completa; es decir, sin rebanar, es deseable enfocar los esfuerzos de selección a materiales con mayor longitud y diámetro de elote.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de 12 genotipos eloteros evaluados en dos localidades.

	VIG	FF	AE	LE	LLMZ	DE	NH	RESH	RGFR	SST	SE
VIG	1										
FF	-0.11ns	1									
AE	0.39**	-0.35**	1								
LE	0.64**	-0.004ns	0.35**	1							
LLMZ	0.67**	-0.2ns	0.39**	0.87**	1						
DE	0.56**	-0.24ns	0.5**	0.75**	0.76**	1					
NH	0.36**	-0.04ns	-0.01ns	0.52**	0.5**	0.62**	1				
RESH	0.6**	-0.24ns	0.45**	0.84**	0.79**	0.93**	0.61**	1			
RGFR	0.54**	-0.3*	0.53**	0.79**	0.81**	0.88**	0.56**	0.9**	1		
SST	-0.77**	0.1ns	-0.44**	-0.66**	-0.77**	-0.56**	-0.27*	-0.61**	-0.59**	1	
SE	-0.67**	0.19ns	-0.4**	-0.33*	-0.37**	-0.37**	-0.16ns	-0.44**	-0.29*	0.69**	1

VIG= vigor de planta; FF= floración femenina; AE= altura de elote; LE= longitud de elote; LLMZ= llenado de elote; DE= diámetro de elote; NH= número de hileras; RESH= rendimiento de elote sin hoja; RGFR= rendimiento de grano fresco rebanado; SST= sólidos solubles totales; SE= sabor de elote; * y **: significancia estadística con $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$, respectivamente; ns= no significativo.

En programas de mejoramiento genético, el rendimiento es una de las variables a las que se atribuye mayor importancia al momento de generar y avanzar productos nuevos al mercado, por esta razón, se resalta la correlación significativa encontrada en rendimiento de grano fresco rebanado (RGFR) con diámetro de elote ($r = 0.88^{**}$) y con rendimiento de elote sin hoja ($r = 0.9^{**}$). Ambas características pueden usarse como criterios de selección indirecta para mejorar el rendimiento.

El rendimiento de elote entero sin hoja presentó una correlación alta ($r = 0.87^{**}$) con longitud de elote. Borroel *et al.* (2018) encontraron una correlación significativa del rendimiento con el diámetro de mazorca ($r = 0.9$) y con la longitud de mazorca ($r = 0.77$), datos similares a los de esta investigación. Existe correlación significativa negativa ($p \leq 0.01$) de SST con VIG, AE, LE, LLMZ, DE, RESH y RGFR de $r = -0.77^{**}$, $r = -0.44^{**}$, $r = -0.66^{**}$, $r = -0.77^{**}$, $r = -0.56^{**}$, $r = -0.61^{**}$ y $r = -0.59^{**}$ respectivamente.

La incorporación del gen superdulce *sh2* tiende a afectar de manera drástica algunas características morfológicas, en especial el vigor, germinación y desarrollo de la plántula, lo cual representa problemáticas específicas de los maíces dulces y superdulces para el manejo de su germoplasma, ya que las mutaciones que dieron origen a estas variedades tienen importantes implicancias sobre la fisiología de la germinación, al tener bloqueada la ruta metabólica de síntesis de almidón, polisacárido que representa la principal sustancia de reserva de la semilla para el caso del maíz (Montoro y Ruiz, 2017); por lo tanto, durante los ciclos de retrocruza es de suma importancia realizar selección para estas variables.

Evaluación sensorial

De acuerdo con los datos obtenidos en la evaluación sensorial, el contenido de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) en los granos estuvo relacionado con la preferencia de consumidor, ya que existe correlación positiva significativa ($p \leq 0.01$) con sólidos solubles totales ($r = 0.69^{**}$), lo que indica que a los panelista les fueron más agradables los materiales dulces, resultado que coincide con lo encontrado por Coutiño *et al.* (2010), quienes señalaron que los maíces dulces con alto contenido de sólidos solubles totales son los de mayor preferencia para su consumo en elote, pero no coinciden totalmente con los hallazgos encontrados por Osorio-Saenz *et al.* (2019), quienes encontraron que también la consistencia del grano tiene influencia en el consumidor.

Recuperación de genoma por retrocruza

La metodología de mejoramiento genético por retrocruzas para incorporar el gen de dulzura a los materiales nativos con características eloterías es eficiente, pues se logró incorporar y mantener el gen, además de recuperar en gran medida las características morfológicas de las poblaciones de interés (Figura 1). Se puede apreciar la recuperación de características conforme se avanza en los ciclos de retrocruzamiento. Al respecto, Ayodeji *et al.* (2019) indicaron que se pueden generar nuevas poblaciones de maíz superdulce mediante retrocruzamientos y selección para dicho carácter. Para la producción comercial es necesario sembrar en lotes aislados para evitar cruzamientos con maíces no dulces.

Para las poblaciones Hgo-428 (Chalqueño) y C-Pue-185 (Cacahuacintle), existen características que se recuperan rápidamente, pero no son las mismas para cada población. En la población Hgo-428 (Chalqueño) se obtiene mayor porcentaje de recuperación para las variables AE, LE, LLMZ y DE con 13.16%, 7.36%, 12.69% y 3.66% respectivamente por cada ciclo de retrocruza aplicado, no así para las variables RESH y RGFR.

Estas variables en la población C-Pue-185 de la raza Cacahuacintle se recuperan más rápido con 8.97% y 8.63%, respectivamente. Las características que se fijaron para ambas poblaciones fueron LE, LLMZ, DE y NH, donde esta última fue la que se recuperó en 100% desde la primera cruza.

Estas características son aprovechadas de forma potencial en programas de mejoramiento genético, caracterizando de manera adecuada a las poblaciones iniciales y ejerciendo presión de selección para identificar y fijar rápidamente dichas características desde los primeros ciclos de retrocruza.

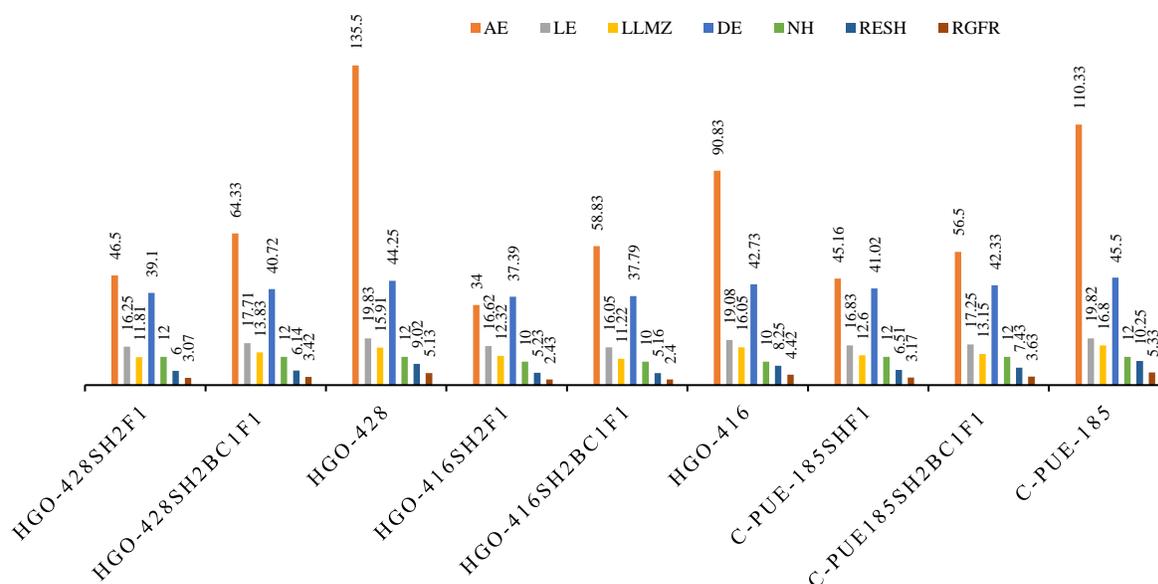


Figura 1. Porcentaje de recuperación de las diferentes variables por retrocruza respecto a las poblaciones originales.

Conclusiones

Existe variabilidad genética entre las poblaciones para las variables vigor de planta (VIG), floración femenina (FF), altura de elote (AE), longitud de elote (LE), llenado de elote (LLMZ), rendimiento de elote sin hoja (RESH), rendimiento de grano fresco rebanado (RGFR), sólidos solubles totales (SST) y sabor de elote (SE), pero no para diámetro de elote (DE) y número de hileras (NH), lo que favorece la identificación de las mejores poblaciones para producción de elote. La población Hgo-428sh2F1 con fondo genético 50% nativo + 50% donador fue la mejor con respecto a SST.

En sabor de elote (SE) sobresalió la misma población Hgo-428sh2BC1F1, pero con fondo genético 75% nativo + 25% donador, seguida de Hgo-428sh2F1, Sweeter 93 y C-Pue185sh2BC1F1. Se identificó a la población formada por Hgo-428 (Chalqueño) como la mejor en calidad, y puede ser un excelente candidato para la comercialización de elote superdulce. El híbrido elotero comercial A7573 destacó en la mayoría de las variables vigor de planta (VIG), floración femenina (FF), longitud de elote (LE), llenado de elote (LLMZ), diámetro de elote (DE) y número de hileras (NH).

Las poblaciones nativas normales Hgo-428 (Chalqueño) y C-Pue-185 (Cacahuacintle) fueron iguales al mejor testigo comercial A7573 en lo referente a rendimiento de grano fresco rebanado y en la dulzura de sus elotes sobresalió Hgo-428 sobre el testigo comercial elotero, lo que alienta a seguir con el proceso de retrocruzas para recuperar las características de las poblaciones iniciales, pero que la variante de dulzura se incluya como valor agregado.

Literatura citada

- Aini, N.; Prihananto, V.; Sustriawan, B.; Romadhon, D. and Ramadhan, R. N. 2019. The formulation of cheese analogue from sweet corn extract. *Inter. J. Food Sci.* 2019: 8624835. Doi: <https://doi.org/10.1155/2019/8624835>.
- Ayodeji, A.; Oladayo, A. L.; and Olabisi, J. A. 2019. Field performance of shrunken-2 super-sweet corn populations derived from tropical field maize Shrunken-2 super-sweet corn crosses in Ibadan, Nigeria. *J. Plant Breed. Crop Sci.* 11(5):158-163. Doi: <https://doi.org/10.5897/JPBCS2018.0797>.
- Borroel, V. J. L.; Salas, P. L.; Ramírez, M. G.; López, J. D. y Luna, A. J. 2018. Rendimiento y componentes de producción de híbridos de maíz en la comarca lagunera. *Terra Latinoam.* 36(4):423-429. Doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.281>
- Coutiño, E. B.; Vidal, M. V. A.; Cruz, G. B. y Cruz, V. C. 2010. Aptitud combinatoria general y específica del contenido de azúcares en maíces criollos eloteros. *Rev. Fitotec. Mex.* 33(4):57-61. Doi: <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.Especial.4.57>.
- Coutiño, E. B.; Vidal, M. V. A.; Cruz, V. C. y Gómez, G. M. 2015. Características eloteras y de grano de variedades nativas de maíz de Chiapas. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(5):1119-1127. Doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i5.603>.
- Enciso, G. C. R.; Maidana, B. J. M. y Santacruz, O. V. 2012. Evaluación de genotipos de maíz dulce. *Investigación Agraria.* 14(2):81-86.
- García, E. 1998. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). DF, México. 217-p.
- Meneses, N.; Mendoza-Cortez, J. W. y Bernardes, C. F. A. 2017. Fertilización potásica del maíz dulce en suelo con alta disponibilidad de potasio. *Agrociencia (Uruguay).* 21(2):54-58.
- Montoro, A. y Ruiz, M. 2017. Ecofisiología del cultivo de maíz dulce (*Zea mays* L. var. *saccharata*). *Horticultura Argentina.* 36(91):153-166.
- Ortiz-Torres, E.; López, P. A.; Gil-Muñoz, A.; Guerrero-Rodríguez, J. D.; López-Sánchez, H.; Taboada-Gaytán, O. R.; Hernández-Guzmán, J. A. y Valadez-Ramírez, M. 2013. Rendimiento y calidad de elote en poblaciones nativas de maíz de Tehuacán, Puebla. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 19(2):225-238. Doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.02.006>.
- Osorio-Sáenz, A.; Santacruz-Varela, A.; Córdova-Téllez, L.; González-Hernández, V. A.; Mascorro-Gallardo, J. O.; Conde-Martínez, F. V. and Carrillo-Castañeda, G. 2019. Mexican maize landraces for corn on the cob production at the central highlands. *Maydica.* 64(2):1-8.
- Paucar-Menacho, L. M.; Salvador-Reyes, R.; Guillén-Sánchez, J. y Mori-Arismendi, S. 2016. Efecto de la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de soya en las características tecnológicas y sensoriales de cupcakes destinados a niños en edad escolar. *Sci. Agropec.* 7(2):121-132. Doi: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.02.05>.
- Revilla, P.; Anibas, C. M. and Tracy, W. F. 2021. Sweet corn research around the world. *Agronomy.* 11(3):534. Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy11030534>.
- Rice, R. R. and Tracy, W. F. 2013. Combining ability and acceptability of temperate sweet corn inbreds derived from exotic germplasm. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 138(6):461-469. Doi: <https://doi.org/10.21273/JASHS.138.6.461>.

- Roy-García, I.; Rivas-Ruiz, R.; Pérez-Rodríguez, M. y Palacios-Cruz, L. 2019. Correlación: no toda correlación implica causalidad. *Rev. Alergia México*. 66(3):354-360. Doi: <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>.
- Sánchez, H. M. A.; Aguilar, M. C. U.; Valenzuela, J. N.; Joaquín, T. B. M.; Sánchez, H. C.; Jiménez, R. M. C. y Villanueva, V. C. 2013. Rendimiento en forraje de maíces del trópico húmedo de México en respuesta a densidades de siembra. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 4(3):271-288.
- SAS Institute. 1999. SAS Procedures Guide, Release 8.0. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 1643 p.
- Severiano, P. P. 2019. ¿Qué es y cómo se utiliza la evaluación sensorial? *Inter Disciplina*. 7(19):47-68. Doi: <http://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2019.19.70287>.
- Shelton, A. C. and Tracy, W. F. 2015. Recurrent selection and participatory plant breeding for improvement of two organic open-pollinated sweet corn (*Zea mays* L.) populations. *Sustainability*. 7(5):5139-5152. Doi: <https://doi.org/10.3390/su7055139>.
- Sierra-Macías, M.; Andres-Meza, P.; Palafox-Caballero, A. y Meneses-Márquez, I. 2016. Diversidad genética, clasificación y distribución racial del maíz nativo en el estado de Puebla, México. *Rev. Cienc. Natur. Agropec.* 3(9):12-21.
- Valdivia-Bernal, R.; Caro-Velarde, F. J.; Medina-Torres, R.; Ortiz-Catón, M.; Espinosa-Calderón, A.; Vidal-Martínez, V. A. y Ortega-Corona, A. 2010. Contribución genética del criollo Jala en variedades eloteras de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 33(4):63-67. Doi: <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.Especial-4.63>.
- Yang, R.; Li, Y.; Zhang, Y.; Huang, J.; Liu, J.; Lin, Z.; Yu, Q.; Wu, A. and Wang, B. 2021. Widely targeted metabolomics analysis reveals key quality-related metabolites in kernels of sweet corn. *Inter. J. Gen.* 2021: 2654546. Doi: <https://doi.org/10.1155/2021/2654546>.
- Zaluski, W. L.; Faria, M. V.; Rosa, J. C.; Udhre R. S.; Sagae, V. S.; Chiquito, N. R.; Gava, E.; Paiva, E. A. P. and Silva, P. R. 2021. Yield related key traits in the selection of super sweetcorn hybrids. *Bragantia*. 80:e3321. Doi: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200484>.