

Fenología y contenido de capsaicinoides en chile producidos en condiciones de invernadero

Sigfrido David Morales-Fernández[§]
Delia Moreno-Velázquez
Salvador Trinidad-De Jesús
Fabiél Vázquez-Cruz
Armando Ibáñez-Martínez
J. Refugio Tobar-Reyes

Facultad de Ingeniería Agrohidráulica-Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. Universidad s/n, San Juan Acateno, Teziutlán Puebla, México. CP. 73965. Tel. 919 1163799. (demove91@hotmail.com; fabiel.vazquez@correo.buap.mx; armandoibama@outlook.com; refugiotobar71@gmail.com).

[§]Autor para correspondencia: moralesuno1@hotmail.com.

Resumen

En la presente investigación se evaluó en condiciones de invernadero el desarrollo y rendimiento de 10 genotipos de chile y en laboratorio se determinó el contenido de capsaicinoides en frutos con diferente estado de madurez, procedentes de siete municipios del estado de Puebla. El trabajo se realizó en la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se registraron variables de fenología y el contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina se determinó por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). El chile Cera Amarillo presentó el mayor ciclo de crecimiento (4 360 grados día, $p \leq 0.05$) entre todos los genotipos, en tanto que Cera Rojo registró el máximo peso del fruto (795 g, $p \leq 0.05$), atribuido a su mayor diámetro y peso promedio. El contenido de capsaicina, dihidrocapsaicina y capsaicinoides totales más alto (2.65, 0.49 y 2.99 mg g⁻¹, respectivamente) se presentó en el estado de madurez comercial de los frutos. El chile Mirasol mostró mayor estabilidad en el contenido de capsaicina, dihidrocapsaicina y capsaicinoides totales al cambiar del estado de madurez fisiológica a comercial.

Palabras clave: *Capsicum* spp., capsaicina, capsaicinoides totales, crecimiento, dihidrocapsaicina, rendimiento.

Recibido: diciembre de 2019

Aceptado: marzo de 2020

Introducción

El chile género *Capsicum*, es originario de América del Sur y está conformado por aproximadamente 30 especies, de las cuales *C. annuum*, *C. frutescens*, *C. chinense*, *C. baccatum* y *C. pubescens*, han sido domesticadas. Se considera como la segunda verdura más popular en el mundo solo después del tomate (Benson *et al.*, 2014) y en muchos países, es esencialmente valorada por su sabor picante, nutrición y el contenido de pigmentos en los frutos (Tian *et al.*, 2014). La especie *annuum* es la de mayor importancia económica, se cultiva ampliamente en el mundo (Hernández, 2018) y presenta gran variación en su fenología y en el contenido de compuestos bioactivos (Martínez-Damián *et al.*, 2019).

La fenología comprende el análisis de los fenómenos biológicos vinculados a ciertos ritmos periódicos o fases y la relación con el ambiente donde ocurren (Mundarain *et al.*, 2005) y su estudio es esencial para alcanzar el máximo rendimiento en las plantas cultivadas (Morales-Fernández *et al.*, 2018), ya que permite determinar los factores que inciden directamente sobre la productividad del cultivo (Prabhakar *et al.*, 2007).

En el cultivo de *Capsicum*, se pueden identificar cinco fases de desarrollo que comprenden desde el trasplante de las plantas hasta la iniciación floral, plena floración, amarre de fruto, madurez fisiológica y madurez comercial (Soto-Ortiz y Silvertooth, 2008), otros estudios consideran el tiempo en ocurrir la primera, segunda, tercera y cuarta bifurcación del tallo, floración, fructificación y cambio de color del fruto (Moreno-Pérez *et al.*, 2011).

Una forma eficiente de medir la duración de las fases de desarrollo ha sido con el método de calendario de tiempo fisiológico (acumulación de unidades calor), ya que éste permite generar la modelación y predicción de las fases de manera normalizada, en comparación con las variantes número de días (Soto-Ortiz *et al.*, 2006).

Los capsaicinoides son compuestos fenólicos (Bae *et al.*, 2014), amidas derivadas de la vainillilamina, que se sintetizan y acumulan en el tejido de la placenta (Cázares-Sánchez *et al.*, 2005). Son los responsables del picor en los frutos de chile, causado por al menos uno de los 20 compuestos identificados. La capsaicina [(E)-N(4-hidroxi-3-metoxibencil)-8-metil-6-nonenamida] y la dihidrocapsaicina (su análogo 6,7-dihidro) representan más de 90% del contenido total de los capsaicinoides presentes en los chiles (Vázquez-Flota *et al.*, 2007).

Desde el punto de vista genético, la producción de capsaicinoides se hereda como un carácter dominante y está controlada por el locus Pun1 (Blum *et al.*, 2002), en tanto que en condiciones recesivas pun1 / pun1, no son producidos por los chiles. El grado de picor también está regulado por el ambiente y la interacción genotipo-ambiente (Gurung *et al.*, 2011), lo que genera una alta variación del nivel de picor entre y dentro de los genotipos (Zewdie y Bosland, 2000).

La variación en el picor puede ser atribuible a las altas tasas de polinización cruzada (7 a 90%), ocasionando diferencias genéticas en los cultivares (Bozokalfa *et al.*, 2009), la presencia de altas temperaturas durante el ciclo del cultivo (González-Zamora *et al.*, 2013), estrés hídrico por sequía o inundación (Sung *et al.*, 2005) y desequilibrios en la fertilización de los cultivos (Monforte-González *et al.*, 2010).

Algunos estudios relacionados con la evaluación del contenido de capsaicinoides en frutos de chile, han reportado variaciones significativas, dependiendo de los genotipos y los ambientes de producción (Gurung *et al.*, 2011). Cazares-Sánchez *et al.* (2005) reportaron en chiles habaneros valores de 60 901 unidades Scoville, en tanto que en chiles dulces solo 1 519.

Asimismo, Borges-Gómez *et al.* (2010) trabajando con la misma especie obtuvieron 8.4 g kg⁻¹ de capsaicina y 4.7 g kg⁻¹ de dihidrocapsaicina, en frutos cosechados a los 126 días después del trasplante, al estudiar la acumulación de capsaicinoides durante el desarrollo del fruto de chiltepín silvestre, encontraron 8.22 mg g⁻¹ de capsaicina y 4.24 mg g⁻¹ de dihidrocapsaicina en frutos maduros, y 4.24 y 0.53 mg g⁻¹ en frutos inmaduros.

En México, los estudios de fenología y contenido de capsaicinoides se han enfocado a especies de chile con mayor demanda; sin embargo, en las de menor demanda como las nativas son escasos, por lo anterior y con el propósito de generar información disponible para los productores e investigadores interesados en el cultivo, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el desarrollo y rendimiento de 10 genotipos de chile y determinar el contenido de capsaicinoides en frutos con diferente estado de madurez.

Materiales y métodos

Evaluación de los genotipos en invernadero

La investigación se realizó en la Facultad de Ingeniería Agrohídrica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (19° 52' latitud norte y 97° 22' longitud oeste, a 1 676 m), entre los meses de diciembre (2017) y noviembre (2018), bajo condiciones de invernadero (120 m²). Se evaluaron 10 genotipos de chile procedentes de siete municipios del estado de Puebla (Cuadro 1), seleccionados por su origen, área de producción, ciclo de cultivo y tipo de especie.

Cuadro 1. Características de los genotipos de chile estudiados en la investigación.

Nombre común	Especie	Procedencia	Fruto maduro ^z		
			Color	Longitud (cm)	Peso (g)
Chile tipo habanero (G1)	<i>chinense</i>	Zacapoaxtla	Naranja	3.8	93.1
Chile cera amarillo (G2)	<i>pubescens</i>	Tlatlauquitepec	Amarillo	4.4	312.5
Chile loco (G3)	<i>annuum</i>	Cholula	Purpura	16.4	375
Chile criollo mediano tipo serrano (G4)	<i>annuum</i>	Cuetzalan	Rojo	3.5	15.8
Chile de árbol (G5)	<i>annuum</i>	Tetela de Ocampo	Naranja	7.8	41.9
Chile cera rojo (G6)	<i>pubescens</i>	Tlatlauquitepec	Rojo	4.5	395
Chile criollo tipo jalapeño (G7)	<i>annuum</i>	Hueyapan	Rojo	5.5	106.6
Chiltepín (G8)	<i>annuum</i>	Cuetzalan	Rojo	1	5.2
Chile Mirasol (G9)	<i>annuum</i>	Hueyapan	Rojo	4.9	14.4
Chile criollo tipo serrano (G10)	<i>annuum</i>	Teziutlán	Rojo	12.4	136.7

^z= valores promedio de 10 frutos; la longitud de los frutos se realizó de la parte basal a la apical.

Las semillas de los 10 genotipos de chile fueron extraídas de los frutos maduros y secadas a la sombra. En la primera semana de diciembre de 2017, se realizó la siembra en charolas germinadoras de poliestireno de 200 cavidades con la mezcla de sustratos turba, perlita y tierra de monte en relación (1:1:1 v/v/v), depositando dos semillas por cavidad para producir un total de 20 plantas de cada especie, en condiciones de invernadero.

Una vez que las plántulas de los diferentes genotipos de chile tuvieron de 6 a 8 hojas, fueron trasplantadas en bolsas de polietileno calibre 600 (40 x 40 cm), utilizando la misma relación de la mezcla de sustratos que en las charolas germinadoras. Las bolsas se colocaron a una separación de 50 y 20 cm entre hileras y filas, respectivamente.

La fertilización se realizó a los 20 días después del trasplante con la fórmula 200-75-100-20-10 de N, P, K, Ca y Mg y se aplicó 4.6 g de la mezcla en cada bolsa. El riego se aplicó de acuerdo con las necesidades hídricas del cultivo mediante un sistema de riego por goteo con un gasto de 2.49 litros por planta por día en promedio, durante todo el ciclo de crecimiento de los genotipos.

A partir del trasplante y hasta la madurez comercial de los 10 genotipos de chile, se registraron las temperaturas máxima y mínima del aire (°C) con un termómetro de columna de mercurio marca Taylor® modelo 5 458, con esos datos se obtuvo la temperatura media.

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y la unidad experimental estuvo constituida por una bolsa con una planta de chile. El análisis de capsaicinoides poscosecha fue bajo el mismo diseño experimental, para ello se usó el arreglo factorial con los factores genotipos con 10 niveles y estados de madurez con dos niveles.

A partir del trasplante en las bolsas, se determinó el número de días (D) y grados día (G) acumulados hasta el inicio de cada etapa fenológica del cultivo con el método residual clásico, que consiste en sumar la diferencia de la temperatura media diaria y la temperatura base, que en este caso se utilizó un valor de 5 °C (Pérez y Castro, 2008). La etapa de iniciación floral (IF) se determinó en el momento en que se presentó el primer botón floral en todos los genotipos, el amarre de fruto (AF) cuando se observó el marchitamiento, secado y desprendimiento de la corola de la flor, permaneciendo solo el gineceo en desarrollo.

La madurez fisiológica (MF) ocurrió cuando se presentó la máxima acumulación de materia seca del primer fruto y que visualmente se identificó por el color verde característico y el máximo crecimiento en longitud y grosor, en tanto que la madurez comercial (MC), se identificó en el momento en que el primer fruto mostró un cambio en la coloración diferente al verde, pero sin haber perdido la turgencia.

El periodo vegetativo (PV) se consideró como el tiempo transcurrido desde el trasplante de los genotipos en las bolsas hasta la aparición del primer botón floral, estado que se caracteriza por el crecimiento de la parte aérea y el establecimiento del sistema radical. El periodo reproductivo (PR) consideró el intervalo entre la aparición del primer botón floral y la madurez comercial del primer fruto y fue cuando ocurrió la formación y crecimiento del fruto.

En la madurez comercial se determinó la longitud del fruto (LF, cm), la cual consideró desde la parte basal hasta la parte apical. El diámetro ecuatorial del fruto (DF, cm) se realizó en la parte media del fruto, entre la parte basal y apical. El peso de frutos (PF, g) se realizó en 20 frutos de cada unidad experimental. El peso promedio de fruto (PPF, g) se obtuvo al dividir el peso de frutos entre el número de frutos cosechados.

Evaluación de capsaicinoides en laboratorio

Extracción

El contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina de los 10 genotipos de chile, se determinó por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), en frutos completos, cosechados en las etapas de madurez fisiológica y madurez comercial, de acuerdo con la metodología propuesta por Cruz-Pérez *et al.* (2007). Se tomaron 5 ± 0.5 g de frutos molidos en fresco y 10 mL de acetonitrilo grado HPLC colocados en tubos Eppendorf. Los tubos estuvieron en baño de agua durante 5 h a 60 °C, agitando el contenido cada hora. Del sobrenadante se filtraron 2 mL con un acrodisco de 25 mm de diámetro y poro de 0.45 μm (Millipore Co.) y colocados en viales de 2 mL.

Análisis

Se utilizó un equipo de cromatografía líquida de alta resolución, Agilent Technologies, 1260 infinity, compuesto por un auto muestreador, bomba cuaternaria, degasificador, detector de índice de refracción y horno para columnas. Se usó una columna Hypersil ODS[®] (25 cm x 4.6 mm, 5 μm), según Collins *et al.* (1995). Como fase móvil se empleó el gradiente constituido por acetonitrilo: agua grado HPLC en relación 45:55. La velocidad de flujo fue de 1.5 mL min⁻¹, el volumen de muestra inyectado de 20 μL y el tiempo de corrida 20 min. La temperatura de la columna se mantuvo a 26 °C.

Los estándares de capsaicina y dihidrocapsaicina (Sigma, MN) se prepararon en acetonitrilo a una concentración de 1 mg mL⁻¹ cada uno, con éstos, se elaboró la curva de calibración del cromatógrafo. El contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina (mg) se calculó a partir del método oficial 995.03 de la AOAC (1995), donde 0.001 mg de capsaicinoides g⁻¹ equivale a 15 Unidades Scoville de Picor. Los capsaicinoides totales resultaron de la suma del contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina. Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente a través de análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) mediante el paquete Statistical Analysis System (SAS, 2004).

Resultados y discusión

Fenología del cultivo

El conocimiento de la fenología permite identificar los periodos críticos de desarrollo que inciden en el rendimiento de los cultivos. En el Cuadro 2, se observó que el chile Cera Amarillo (G2) requirió mayor número de días y grados día ($p \leq 0.05$) en las etapas de iniciación floral (DIF y GIF), amarre de fruto (DAF y GAF) y madurez fisiológica (DMF y GMF) en comparación con el chile criollo tipo Jalapeño (G7).

En general, los chiles G7, Chiltepín (G8) y Mirasol (G9) necesitaron 20 y 23% menor número de días y grados día en la etapa de DMF y GMF que el G2, por lo que se caracterizaron como los más precoces entre todos los materiales estudiados, lo que indica las grandes diferencias en el comportamiento fenológico que exhiben los genotipos debido a su origen genético (Soto-Ortiz y Silvertooth, 2008; Moreno-Pérez *et al.*, 2011) y ambiente de desarrollo (Mundarain *et al.*, 2005; Gurung *et al.*, 2011).

Cuadro 2. Días y grados día acumulados en las etapas fenológicas de 10 genotipos de chile (*Capsicum spp.*), cultivados en condiciones de invernadero.

Genotipos	DIF	GIF	DAF	GAF	DMF	GMF
G1	175.5 a ^z	2 927 a	189.7 a	3 230.3 a	214 ab	3 712 ab
G2	175.2 a	2 921.8 a	189 a	3 215.5 a	223.7 a	3 901 a
G3	142 bcd	2 237.8 bcd	150.5 cd	2 401.5 bc	185 bc	3 133.5 bc
G4	140.2 bcd	2 205.5 bcd	154.2 bcd	2 471.5 bc	185.7 bc	3 150.8 bc
G5	155.7 abc	2 503.5 abc	169.2 abc	2 790 ab	201 abc	3 455.8 abc
G6	161 ab	2 615.5 ab	177 ab	2 957.8 a	213.5 ab	3 702 ab
G7	128.7 d	1 997.5 d	136.7 d	2 142 c	176.2 c	2 942 c
G8	138 cd	2 162.5 bcd	150 cd	2 386.8 bc	179.3 c	3 012.4 c
G9	132.5 d	2 069.3 cd	142.2 d	2 241.5 c	181 c	3 045 c
G10	136.3 cd	2 136.8 cd	148 cd	2 355.5 bc	184 bc	3 112.5 bc
DMSH	22.7	454.4	23.9	486.2	31.1	633.28

^z= valores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$. DMSH= diferencia mínima significativa honesta; DIF y GIF= días y grados día a iniciación floral; DAF y GAF= días y grados día a amarre de fruto; DMF y GMF= días y grados día a madurez fisiológica; G1= chile tipo habanero; G2= chile cera amarillo; G3= chile loco; G4= chile criollo mediano tipo serrano; G5= chile de árbol; G6= chile cera rojo; G7= chile criollo tipo jalapeño; G8= chiltepín; G9= chile mirasol; G10= chile criollo tipo serrano.

La etapa de madurez comercial y la duración de los periodos vegetativo y reproductivo fue diferencial (Cuadro 3). Los genotipos G7, G8 y G9 requirieron 19 y 20% menos tiempo (días y grados día) para la madurez comercial (DMC y GMC) en comparación con el G2. Los genotipos G7 y G9 tuvieron el menor número de días y grados día ($p \leq 0.05$) durante el periodo vegetativo (DPV y GPV) en comparación con el chile Tipo Habanero G1 y el G2; es decir, tuvieron una diferencia de 45 días y 891 grados día. El periodo reproductivo requirió 28 y 18% menor número de días (DPR) y grados día (GPR) en el genotipo G1 que en el chile Cera Rojo (G6).

Estos resultados indican en general, que el número de DPV y GPV fue mayor que el número de DPR y GPR en todos los genotipos, situación que puede hacerse presente cuando se genera competencia por el espacio, ocasionando un retraso en la floración y fructificación (Luján y Chávez, 2003) como ocurrió en la presente investigación, aunque el tipo de especie (Montes *et al.*, 2004), el hábito de crecimiento y el número de cortes puede afectar la duración del periodo reproductivo de los genotipos (Vázquez-Vázquez *et al.*, 2011).

Cuadro 3. Días y grados día acumulados en la etapa de madurez comercial, periodos vegetativo y reproductivo de 10 genotipos de chile (*Capsicum* spp.), cultivados en condiciones de invernadero.

Genotipos	DMC	GMC	DPV	GPV	DPR	GPR
G1	234.2 ab ^z	4026.5 abc	175.5 a	2927 a	58.7 b	1099 b
G2	249.6 a	4360.3 a	175.2 a	2921.8 a	79 ab	1538 ab
G3	211 bc	3653.3 bcd	142 bcd	2237.8 bcd	76.3 ab	1555 a
G4	211.7 bc	3668.3 bcd	140.2 bcd	2205.5 bcd	71.5 ab	1462.8 ab
G5	218.5 bc	3799.5 bcd	155.7 abc	2503.5 abc	67.6 ab	1388.7 ab
G6	237.5 ab	4144.5 ab	161 ab	2615.5 ab	81.5 a	1639 a
G7	203.5 c	3508.8 cd	128.7 d	1997.5 d	71 ab	1441.3 ab
G8	201 c	3462 d	138 cd	2162.5 bcd	63 ab	1299.5 ab
G9	202.2 c	3483.5 cd	132.5 d	2069.3 cd	73 ab	1427.7 ab
G10	213.3 bc	3699.3 bcd	136.3 cd	2136.8 cd	77 ab	1562.8 a
DMSH	27.6	552.5	22.7	454.4	22.55	452.8

^z= valores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$. DMSH= diferencia mínima significativa honesta; y GMC= días y grados día a madurez comercial; DPV y GPV= días y grados día durante el periodo vegetativo; DPR y GPR= días y grados día durante el periodo reproductivo; G1= chile tipo habanero; G2= chile cera amarillo; G3= chile loco; G4= chile criollo mediano tipo serrano; G5= chile de árbol; G6= chile cera rojo; G7= chile criollo tipo jalapeño; G8= chiltepín; G9= chile mirasol; G10= chile criollo tipo serrano.

Rendimiento y sus componentes

El rendimiento de los genotipos, expresado en peso del fruto (PF) fue variado (Cuadro 4). El genotipo G6 presentó el mayor rendimiento por planta ($p \leq 0.05$) entre todos los materiales estudiados, es decir, superó 18% al G2 y al chile Loco (G3) quienes fueron los más cercanos en este carácter. Este parámetro estuvo asociado con el mayor diámetro del fruto (DF) ya que, junto con el peso promedio del fruto (PPF), fueron los principales componentes que contribuyeron con el rendimiento de chile, lo que concuerda con lo reportado por Moreno-Pérez *et al.* (2011), aunque según López-Gómez *et al.* (2020) además de estos caracteres, el número de frutos por planta también influye en el peso final. La longitud del fruto (LF) en el genotipo G3 fue 21% mayor que en el chile rojo tipo Serrano (G10).

Cuadro 4. Caracteres del rendimiento en 10 genotipos de chile (*Capsicum* spp.), cultivados en condiciones de invernadero.

Genotipos	PF (g)	LF (cm)	DF (cm)	PPF (g)
G1	137.27 de ^z	3.5 de	3.13 b	6.86 de
G2	631.6 b	4.43 de	4.73 a	31.56 b
G3	673 b	14.6 a	3.17 b	33.65 b
G4	28.3 f	3.15 e	1.07 d	1.42 f

Genotipos	PF (g)	LF (cm)	DF (cm)	PPF (g)
G5	65.95 ef	7.57 c	0.97 de	3.3 ef
G6	795 a	4.45 de	4.6 a	39.75 a
G7	185.65 d	5.3 d	2.05 c	9.3 d
G8	10.97 f	1.03 f	0.63 e	0.56 f
G9	30.55 f	4.02 de	0.77 de	1.55 f
G10	276.2 c	11.5 b	1.8 c	13.8 c
DMSH	71.47	1.87	0.4	3.75

^z= valores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$. DMSH= diferencia mínima significativa honesta. PF= peso del fruto; LF= longitud del fruto; DF= diámetro del fruto; PPF= peso promedio del fruto; G1= chile tipo habanero; G2= chile cera amarillo; G3= chile loco; G4= chile criollo mediano tipo serrano; G5= chile de árbol; G6= chile cera rojo; G7= chile criollo tipo jalapeño; G8= chiltepín; G9= chile mirasol; G10= chile criollo tipo serrano.

Contenido de capsaicinoides

Los capsaicinoides responsables del picor en los frutos de chile (González-Zamora *et al.*, 2013), mostraron variación significativa entre genotipos y estados de madurez. El contenido de capsaicina (CAP), dihidrocapsaicina (DIH) y capsaicinoides totales (CTOT) en los frutos de chile fluctuó de 0.03 a 1.95 mg g⁻¹ en el estado de madurez fisiológica y de 0.04 a 2.99 mg g⁻¹ en la madurez comercial (Cuadro 5), lo que concuerda con lo reportado por Montoya-Ballesteros *et al.* (2010) al indicar que en algunas especies de chile, las mayores concentraciones de capsaicinoides se presentan en frutos maduros, situación que refleja el comportamiento diferencial de los genotipos en la acumulación de capsaicinoides durante el desarrollo del fruto (Rahman e Inden, 2012).

Cuadro 5. Contenido de capsaicinoides en frutos de 10 genotipos de chile (*Capsicum* spp.), cultivados en condiciones de invernadero.

Genotipos	Madurez fisiológica (mg g ⁻¹ pf)			Madurez comercial (mg g ⁻¹ pf)		
	CAP	DIH	CTOT	CAP	DIH	CTOT
G1	1.7 a ^z	0.25 b	1.95 a	2.65 a	0.34 b	2.99 a
G2	0.36 b	0.23 bc	0.59 b	0.09 d	0.16 cd	0.25 d
G3	0.1 b	0.05 e	0.15 b	0.1 d	0.08 de	0.18 d
G4	0.15 b	0.03 e	0.18 b	0.33 cd	0.04 e	0.37 cd
G5	0.5 b	0.07 de	0.57 b	0.38 cd	0.06 de	0.44 cd
G6	0.42 b	0.21 bc	0.63 b	0.09 d	0.07 de	0.16 d
G7	0.29 b	0.09 de	0.38 b	0.17 cd	0.08 de	0.25 d
G8	0.41 b	0.15 cd	0.56 b	0.8 bc	0.25 bc	1.06 bc
G9	1.22 a	0.48 a	1.7 a	1.18 b	0.49 a	1.67 b
G10	0.07 b	0.03 e	0.1 b	0.11 d	0.05 de	0.16 d
DMSH	0.53	0.08	0.62	0.63	0.11	0.74

^z= valores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$. DMSH= diferencia mínima significativa honesta; PF= peso del fruto; LF= longitud del fruto; DF= diámetro del fruto; PPF= peso promedio del fruto; G1= chile tipo habanero; G2= chile cera amarillo; G3= chile loco; G4= chile criollo mediano tipo serrano; G5= chile de árbol; G6= chile cera rojo; G7= chile criollo tipo jalapeño; G8= chiltepín; G9= chile mirasol; G10= chile criollo tipo serrano.

En la madurez fisiológica, los genotipos G1 y G9 tuvieron 81 y 79% mayor contenido de CAP y CTOT que el resto de los materiales. Asimismo, el G9 fue el que registró el mayor contenido de DIH (Cuadro 5). En la madurez comercial, se observó que el genotipo G1 fue el que presentó los mayores valores de CAP y CTOT ($p \leq 0.05$), ya que, en promedio tuvo 82 y 83% mayor contenido en estos caracteres estudiados que en los demás materiales.

Estos resultados indican que el grado de picor entre los diferentes materiales fue variado, ya que se tuvieron diferencias de 2.83 mg g^{-1} de CTOT entre los genotipos de mayor y menor pungencia en la madurez comercial. Al respecto, Gurung *et al.* (2011) indican que la genética de las especies aun, sobre las condiciones ambientales, es la que asume el papel principal en la síntesis y acumulación de capsaicinoides, además, otros estudios han reportado que algunos materiales de la especie *chinense* tienden a ser más pungentes que *annuum* (Sanatombi y Sharma, 2008), como ocurrió en la presente investigación, en la que Habanero (G1) fue en general el de mayor picor entre todas las especies estudiadas.

El análisis de los 10 genotipos en los dos estados de madurez de los frutos de chile indicó que el contenido de CAP y CTOT en G1 y G8, exhibieron significativamente mayor variación al cambiar de una condición de madurez a otra (Cuadro 6). Un comportamiento similar se observó en la DIH para los G6 y G8, lo que indica el grado de respuesta que muestran algunos materiales al ser evaluados en diferentes condiciones (Gurung *et al.*, 2011), aunque también, la acumulación de capsaicinoides depende de la edad y etapa de desarrollo del fruto (Estrada *et al.*, 1998), como se observó en éste trabajo, en donde el contenido de CAP y CTOT en el genotipo G1 fue 36 y 35% mayor durante la madurez comercial que en la fisiológica.

Cuadro 6. Contenido de capsaicinoides en frutos de 10 genotipos de chile (*Capsicum* spp.) por efecto del genotipo y el estado de madurez, en condiciones de invernadero.

Genotipos	Estado de madurez	Capsaicinoides (mg g^{-1} PF)		
		CAP	DIH	CTOT
G1	MF	1.7 b ^z	0.25 bc	1.95 b
G1	MC	2.65 a	0.345 b	2.995 a
G2	MF	0.365 de	0.235 cd	0.595 de
G2	MC	0.095 e	0.165 cde	0.255 e
G3	MF	0.106 e	0.055 fg	0.155 e
G3	MC	0.105 e	0.085 efg	0.19 e
G4	MF	0.15 e	0.035 g	0.185 e
G4	MC	0.335 de	0.045 g	0.375 e
G5	MF	0.505 de	0.07 efg	0.575 de
G5	MC	0.385 de	0.065 fg	0.445 de
G6	MF	0.425 de	0.215 cd	0.635 de
G6	MC	0.09 e	0.07 efg	0.16 e
G7	MF	0.295 de	0.09 efg	0.385 e
G7	MC	0.175 e	0.085 efg	0.255e

Capsaicinoides (mg g ⁻¹ PF)					
Genotipos	Estado de madurez	CAP	DIH	CTOT	
G8	MF	0.415 de	0.15 def	0.565 de	
G8	MC	0.805 cd	0.255 bc	1.06 cd	
G9	MF	1.22 bc	0.48 a	1.7 bc	
G9	MC	1.185 bc	0.495 a	1.675 bc	
G10	MF	0.07 e	0.03 g	0.105 e	
G10	MC	0.115 e	0.05 g	0.165 e	
DMSH		0.571	0.099	0.669	

Z= valores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$. DMSH= diferencia mínima significativa honesta; PF= peso fresco; CAP= capsaicina; DIH= dihidrocapsaicina; CTOT= capsaicinoides totales; MF= madurez fisiológica; MC= madurez comercial; G1= chile tipo habanero; G2= chile cera amarillo; G3= chile loco; G4= chile criollo mediano tipo serrano; G5= chile de árbol; G6= chile cera rojo; G7= chile criollo tipo jalapeño; G8= chiltepín; G9= chile mirasol; G10= chile criollo tipo serrano.

El genotipo G9 fue el que presentó la menor variación ($p \leq 0.05$) en el contenido de CAP, DIH y CTOT al cambiar de la madurez fisiológica a la comercial, característica que podría ser de importancia en los programas de mejoramiento genético del picor, ya que el objetivo del fitomejorador es desarrollar genotipos uniformes y estables con niveles específicos de picor (Zewdie y Bosland, 2000). Dos condiciones indican que G9 es un material prometedor para un programa de fitomejoramiento, su variación mínima en contenido de capsaicinoides y su mayor contenido de éstos después de G1.

Los genotipos G2 y G6 tuvieron en promedio 76% mayor contenido de CAP en la madurez fisiológica que en la comercial, resultado que pudo ser debido a la competencia que existe en la síntesis de metabolitos en la misma ruta metabólica, entre ellos la capsaicina, lo que condujo a una disminución durante la madurez del fruto (Gurung *et al.*, 2011).

Otros estudios indican que la mayor acumulación de capsaicinoides en algunas especies de chile puede ocurrir antes de la madurez comercial (Cruz-Pérez *et al.*, 2007), aunque la variación en el contenido de capsaicinoides en los diferentes estados de desarrollo del fruto, es atribuida a la expresión genotípica de las especies (Rahman e Inden, 2012).

Conclusiones

La mayor duración del ciclo biológico en el chile Cera Amarillo, no se reflejó en un mayor peso del fruto. Los componentes del rendimiento que más contribuyeron en el chile Cera Rojo, el de mayor peso de fruto, fueron el diámetro y peso promedio del fruto. El contenido de capsaicina y capsaicinoides totales varió de acuerdo con el estado de madurez del fruto.

Las concentraciones mayores se presentaron en los genotipos tipo Habanero y Mirasol en la madurez fisiológica, y en el Habanero en la madurez comercial. En general, las mayores concentraciones de capsaicina, dihidrocapsaicina y capsaicinoides totales, se presentaron en el estado de madurez comercial de los frutos.

Literatura citada

- AOAC. 1995. Association of Official Analytical Chemists. Capsaicinoids in capsicums and their extractives. Liquid chromatographic method. Oficial Method 995.03. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9621667>.
- Bae, H.; Jayaprakasha, G. K.; Crosby, K.; Yoo, K. S.; Leskovar, D. I.; Jifon, J. and Patil, B. S. 2014. Ascorbic acid, capsaicinoid, and flavonoid aglycone concentrations as a function of fruit maturity stage in greenhouse-grown peppers. *J. Food Comp. Anal.* 33(2):195-202.
- Benson, G. A. S.; Obadofin, A. A. and Adesina, J. M. 2014. Evaluation of plant extracts for controlling insect pests of pepper (*Capsicum* spp.) in Nigeria humid rainforest. *New York Sci. J.* 7(1):39-43.
- Blum, E.; Liu, K.; Mazourek, M.; Yoo, E. Y.; Jahn, M. and Paran, I. 2002. Molecular mapping of the C locus for presence of pungency in *Capsicum*. *Genome.* 45(4): 702-705.
- Borges-Gómez, L.; Cervantes-Cárdenas, L.; Ruiz-Novelo, J.; Soria-Fregoso, M.; Reyes-Oregel, V. y Villanueva-Couoh, E. 2010. Capsaicinoides en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) bajo diferentes condiciones de humedad y nutrición. *Terra Latinoam.* 28(1):35-41.
- Bozokalfa, M. K.; Esiyok, D. and Turhan, K. 2009. Patterns of phenotypic variation in a germplasm collection of pepper (*Capsicum annum* L.) from Turkey. *Spanish J. Agric. Res.* 7(1):83-95.
- Cázares-Sánchez, E.; Ramírez-Vallejo, P.; Castillo-González, F.; Soto-Hernández, R. M.; Rodríguez-González, M. T. y Chávez-Servia, J. L. 2005. Capsaicinoides y preferencia de uso en diferentes morfotipos de chile (*Capsicum annum* L.) del centro-oriente de Yucatán. *Agrociencia.* 39(6):627-638.
- Collins, M. D.; Wasmud, L. M. and Bosland, P. W. 1995. Improved method for quantifying capsaicinoids in *Capsicum* using high performance liquid chromatography. *HortScience.* 30(1):137-139.
- Cruz-Pérez, A. B.; González-Hernández, V. A.; Soto-Hernández, R. M.; Gutiérrez-Espinosa, M. A.; Gardea-Béjar, A. A. y Pérez-Grajales, M. 2007. Capsaicinoides, vitamina C y heterosis durante el desarrollo del fruto de chile manzano. *Agrociencia.* 41(6):627-635.
- Estrada, B.; Pomar, F.; Díaz, J.; Merino, F.; and Bernal, M. A. 1998. Effects of mineral fertilizer supplementation on fruit development and pungency in 'Padron' peppers. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 73(4):493-497.
- González-Zamora, A.; Sierra-Campos, E.; Luna-Ortega, J.; Pérez-Morales, R.; Ortiz, J. and García-Hernández, J. 2013. Characterization of different *Capsicum* varieties by evaluation of their capsaicinoids content by high performance liquid chromatography, determination of pungency and effect of high temperature. *Molecules.* 18(11):13471-13486.
- Gurung, T.; Techawongstien, S.; Suriharn, B. and Techawongstien, S. 2011. Impact of environments on the accumulation of capsaicinoids in *Capsicum* spp. *HortScience.* 46(12):1576-1581.
- Hernández, V. S. 2018. El chile silvestre ecología, evolución y genética. Biblioteca Básica de Agricultura. Primera edición. Texcoco, México. 158 p.
- López-Gómez, D. L.; Sotelo-Nava, H.; Villegas-Torres, O. G. y Andrade-Rodríguez, M. A. 2020. Rendimiento y calidad del chile habanero en respuesta a la poda de conducción y régimen nutrimental. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 11(2):315-325.
- Luján-Favela, M. y Chávez-Sánchez, N. 2003. El arreglo topológico y su efecto en el crecimiento desarrollado y producción del chile jalapeño (*Capsicum annum* L.). *Rev. Fitotec. Mex.* 26(2):81-87.

- Martínez-Damián, M. T.; Cruz-Álvarez, O.; Moreno-Pérez, E. D. C. y Valle-Guadarrama, S. 2019. Intensidad de color y compuestos bioactivos en colectas de chile guajillo del norte de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 10(1):35-49.
- Monforte-González, M.; Guzmán-Antonio, A.; Uuh-Chim, F. and Vázquez-Flota, F. 2010. Capsaicin accumulation is related to nitrate content in placentas of habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.). *J. Sci. Food Agric.* 90(5):764-768.
- Montes, S.; Heredia, E. y Aguirre, A. 2004. Fenología del cultivo del chile (*Capsicum annuum* L.). Primera convención mundial de chile. Consejo Nacional de Productores de Chiles. León Guanajuato, México. 23-27 pp. [https://scholar.google.com.mx/scholar?cluster=4438390814846261438&hl=es&as_sdt=2005&sciodt=0,5&scioq=montes,+s.,+heredia,+e.,+%26+aguirre\(2004\).+fenolog%c3%ada+del+cultivo+del+chile+\(capsicum+annuum+l\).+cultivo+y+recursos+gen%C3%A9ticos](https://scholar.google.com.mx/scholar?cluster=4438390814846261438&hl=es&as_sdt=2005&sciodt=0,5&scioq=montes,+s.,+heredia,+e.,+%26+aguirre(2004).+fenolog%c3%ada+del+cultivo+del+chile+(capsicum+annuum+l).+cultivo+y+recursos+gen%C3%A9ticos).
- Montoya-Ballesteros, L. C.; Gardea-Béjar, A.; Ayala-Chávez, G. M.; Martínez-Núñez, Y. Y. y Robles-Ozuna, L. E. 2010. Capsaicinoides y color en chiltepín (*Capsicum annuum* var. *Aviculare*): efecto del proceso sobre salsas y encurtidos. *Rev. Mex. Ing. Química.* 9(2):197-207.
- Morales-Fernández, S. D.; Mora-Aguilar, R.; Salinas-Moreno, Y.; Rodríguez-Pérez, J. E.; Colinas-León, M. T. y Lozoya-Saldaña, H. 2018. Crecimiento y contenido de azúcares de tubérculo de papa en cuatro estados de madurez en condiciones de invernadero. *Rev. Chapingo Ser. Horticu.* 24(1):53-67.
- Moreno-Pérez, E. D. C.; Mora-Aguilar, R.; Sánchez-Del Castillo, F. y García-Pérez, V. 2011. Fenología y rendimiento de híbridos de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) cultivados en hidroponía. *Rev. Chapingo Ser. Horticu.* 17(2):5-18.
- Mundarain, M. C. S. y Cañizares, A. 2005. Fenología del crecimiento y desarrollo de plántulas de ají dulce (*Capsicum frutescens* L.). *Revista Científica UDO Agrícola.* 5(1):62-67.
- Pérez, J. M. y Castro, B. R. 2008. El chile manzano. Departamento de Publicaciones UACH. Primera edición. Texcoco, Estado de México. 128 p.
- Prabhakar, B. N.; Halepyati, A. S.; Desai, B. K. and Pujari, B. T. 2007. Growing degree days and photo thermal units' accumulation of wheat (*Triticum aestivum* L. and *T. durum* Desf.) genotypes as influenced by dates of sowing. *Karnataka J. Agric. Sci.* 20(3):594-595.
- Rahman, M. J. and Inden, H. 2012. Effect of nutrient solution and temperature on capsaicin content and yield contributing characteristics in six sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars. *J. Food, Agric. Environ.* 10(1):524-529.
- Sanatombi, K. and Sharma, G. J. 2008. Capsaicin content and pungency of different *Capsicum* spp. cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 36(2):89-90.
- SAS Institute. 2004. SAS/STAT User's guide, software 9.1. SAS Institute Inc. Cary, NC. USA.
- Soto-Ortiz, R. and Silvertooth, J. C. 2008. A crop phenology model for irrigated New Mexico chile (*Capsicum annuum* L.) type varieties. College of Agriculture and Life Sciences. University of Arizona. *Vegetable Report.* 104-112 pp. <http://hdl.handle.net/10150/215050>.
- Soto-Ortiz, R.; Silvertooth, J. C. and Galadima, A. 2006. Crop phenology for irrigated chiles (*Capsicum annuum* L.) in Arizona and New Mexico. College of Agriculture and Life Sciences. University of Arizona. *Vegetable Report.* 1-15 pp. <http://hdl.handle.net/10150/215001>.
- Sung, Y.; Chang, Y. Y. and Ni-Lun, T. I. N. G. 2005. Capsaicin biosynthesis in water-stressed hot pepper fruits. *Botanical Bulletin of Academia Sinica.* 46(1):35-42.

- Tian, S. L.; Lu, B. Y.; Gong, Z. H. and Shah, S. N. M. 2014. Effects of drought stress on capsanthin during fruit development and ripening in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Agric. Water Management*. 137(1385):46-51.
- Vázquez-Flota, F.; Miranda-Ham, M. D. L.; Monforte-González, M.; Gutiérrez-Carbajal, G.; Velázquez-García, C. y Nieto-Pelayo, Y. 2007. La biosíntesis de capsaicinoides, el principio picante del chile. *Rev. Fitotec. Mex* 30(4):353-360.
- Vázquez-Vázquez, C.; García-Hernández, J. L.; Salazar-Sosa, E.; López-Martínez, J. D.; Valdez-Cepeda, R. D.; Orona-Castillo, I. y Preciado-Rangel, P. 2011. Aplicación de estiércol solarizado al suelo y la producción de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.). *Rev. Chapingo. Ser. Hortic.* 17(1):69-74.
- Zewdie, Y. and Bosland, P. W. 2000. Evaluation of genotype, environment, and genotype-by-environment interaction for capsaicinoids in *Capsicum annuum* L. *Euphytica*. 111(3):185-190.