



CALIDAD DE SEMILLAS DE TOMATE PRODUCIDAS EN TEMPERATURA ALTA DURANTE DIFERENTES ETAPAS DE DESARROLLO

QUALITY OF TOMATO SEEDS PRODUCED AT HIGH TEMPERATURE DURING DIFFERENT STAGES OF DEVELOPMENT

Victoria A. Delgado-Vargas¹, J. Jesús Magdaleno-Villar², Hilda V. Silva-Rojas¹, Gabino García-de los Santos¹ y Oscar J. Ayala-Garay^{1*}

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, PREGEP-Fisiología Vegetal y Producción de Semillas, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, ²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Chapingo, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (oayala@colpos.mx)

RESUMEN

Existen pocos estudios en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) sobre el efecto de la temperatura alta durante el desarrollo de la semilla. El objetivo de esta investigación fue evaluar parámetros de calidad física y fisiológica de semillas de frutos desarrollados en temperatura alta durante diferentes etapas de su desarrollo. La variedad nativa Campeche 40 (C40), la variedad Money Maker (MM) y la línea experimental L52 se sembraron en la primavera de 2020 utilizando dos secciones de un invernadero: una ventilada para el tratamiento control (TC, temperatura máxima promedio TMP = 35.2 °C) y otra con calefacción para el tratamiento de temperatura alta (TA, TMP = 38.6 ± 3.1 °C). Se aplicó TA en cuatro etapas de desarrollo de frutos del cuarto racimo, T1: desde antesis, T2: 15 d después de antesis (DDA), T3: 30 DDA, T4: 45 DDA, hasta madurez en cada caso. El contenido de humedad promedio de la semilla de todos los tratamientos fue de 7.2 %. Los genotipos C40 y MM produjeron un mayor ($P \leq 0.01$) número de semillas por fruto (99) que L52 (53.3). El peso de mil semillas (PS) y la longitud de la semilla (LS) de MM fue superior (2.97 g y 3.66 mm, respectivamente) al resto. Las semillas de C40 fueron más vigorosas (germinación de semilla envejecida GEA = 99 % y velocidad de emergencia de radículas de semilla envejecida VEEA = 5.94 radículas d⁻¹). El tratamiento control TC produjo semillas con PS y LS mayores (2.95 g y 3.7 mm, respectivamente) pero menos vigorosas. Las semillas que en cualquier etapa de su desarrollo fueron afectadas por TA germinaron mejor y más rápido después de ser sometidas al tratamiento de envejecimiento acelerado. La temperatura alta favoreció la calidad fisiológica de semillas, pero no la calidad física.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., calidad física, calidad fisiológica, semillas, vigor.

SUMMARY

There are few studies in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) on the effect of high temperature during seed development. The objective of this research was to evaluate physical and physiological quality parameters of seeds from fruits developed at high temperature during different stages of development. The native variety Campeche 40 (C40), the variety Money Maker (MM) and the experimental line L52 were planted in the Spring 2020 using two sections of a greenhouse, one ventilated for the control treatment (CT, average maximum temperature AMT = 35.2 °C) and the other one with heating for the high temperature treatment (HT, AMT = 38.6 °C). The high temperature was applied at four stages of fruit development of the fourth cluster, T1: from anthesis, T2:

15 d after anthesis (DAA), T3: 30 DAA, T4: 45 DAA, up to maturity in each case. The average seed moisture content of all treatments was 7.2 %. Genotypes C40 and MM produced a higher ($P \leq 0.01$) number of seeds per fruit (99) than L52 (53.3). One-thousand seed weight (SW) and seed length (SL) of MM were higher (2.97 g and 3.66 mm, respectively) than the rest. Seeds from C40 was more vigorous (germination of aged seed GEA = 99 % and root emergence rate of aged seed VEEA = 5.94 radicles d⁻¹). Control treatment (CT) produced seeds with higher SW and SL (2.95 g and 3.7 mm, respectively) but less vigorous. Seeds that at any stage of their development were affected by HT germinated better and faster after being subjected to the accelerated aging treatment. High temperature favored the physiological quality of seeds, but not the physical quality.

Index words: *Solanum lycopersicum* L., physical quality, physiological quality, vigor.

INTRODUCCIÓN

La temperatura es un factor que afecta el crecimiento de los cultivos durante las diferentes etapas fenológicas (Hatfield y Prueger, 2015). Mantener una temperatura favorable es muy importante para el crecimiento de las plantas porque la tasa máxima de crecimiento se produce dentro de un intervalo de temperatura relativamente estrecho. El óptimo térmico de crecimiento de la planta es el resultado combinado de componentes bioquímicos, genéticos y ambientales (Taiz et al., 2018).

La respuesta de las plantas a la temperatura alta (TA) depende de la etapa fenológica en la que se encuentre; además, cada especie responde a un intervalo definido de temperaturas máximas y mínimas, que forman los límites del crecimiento observable (Hatfield y Prueger, 2015). En el caso del tomate (*Solanum lycopersicum* L.), la temperatura óptima de crecimiento es de alrededor de 25 °C en el día y 15 de °C en la noche (Bugbee y White, 1984; Islam, 2011), y existen pocos estudios del impacto de la TA en el crecimiento y desarrollo de la semilla (Delgado-Vargas et

al., 2018; Ruiz-Nieves *et al.*, 2021b; Singkaew *et al.*, 2017).

El uso de semillas de alta calidad constituye un elemento básico en la producción hortícola, puesto que estas semillas ofrecen mayor probabilidad de éxito en el establecimiento de la plántula (Taylor, 2020), lo que al final de ciclo de cultivo conduce a mayores rendimientos; además, la semilla de alta calidad mantiene mayor viabilidad durante el almacenamiento, aún en condiciones no óptimas (Pichardo *et al.*, 2010).

La calidad de semilla comprende aspectos genéticos, fitosanitarios, físicos (número de semillas por unidad, tamaño, volumen, peso, peso volumétrico, pureza del lote de semillas, color de testa, dureza de testa, daño físico de testa, manchado de la semilla) y fisiológicos (viabilidad, capacidad germinativa, vigor) (Bewley *et al.*, 2013). Los componentes de la calidad final de la semilla se ven afectados por las condiciones de crecimiento de la planta principalmente durante la fase de desarrollo de ésta (Singkaew *et al.*, 2017).

El desarrollo de la semilla inicia después de la polinización, cuando el óvulo se activa para la división celular y la histodiferenciación, que formarán los tejidos del embrión y endospermo. Simultáneamente se presentan flujos de agua que expanden las células formadas y llevan compuestos que permiten la síntesis y almacenamiento de reservas, lo que incrementa su peso. La maduración de la semilla se alcanza con la pérdida de agua (desechamiento de tejidos) y el desarrollo de los procesos que permiten a la semilla sobrevivir con bajos contenidos de humedad (Taiz *et al.*, 2018); así, la formación de la semilla, tradicionalmente se ha dividido en tres fases: i) histodiferenciación y expansión celular, ii) acumulación de reservas y iii) adquisición de tolerancia a la desecación (Martínez-Muñoz *et al.*, 2019). La conformación de los tejidos hace que las membranas celulares sean más resistentes y no existan flujos del contenido intracelular, por lo que los valores de conductividad eléctrica en semillas bien desarrolladas disminuyen, en paralelo con el incremento de la capacidad germinativa y el vigor de las semillas (ISTA, 2021); igualmente, una semilla vigorosa posee mayores valores de respiración al momento de la germinación. Tradicionalmente se considera que una semilla de alta calidad fisiológica posee mejores atributos en germinación (mayor porcentaje y velocidad) y vigor (mayor resistencia al almacenamiento en condiciones adversas y respiración, así como menor conductividad eléctrica en la solución de imbibición) (Taylor, 2020).

El tomate es la segunda hortaliza más cultivada en el mundo, es muy apreciada por su valor nutricional, y actúa

como un agente contra radicales libres (anticancerígeno) (Pérez-Díaz *et al.*, 2020). México se considera centro de origen y domesticación de esta especie, por lo que existe una gran diversidad de tipos, lo cual representa una gran riqueza de recursos genéticos (Razifard *et al.*, 2020). En este sentido, la FAO (2015) considera que una manera de mitigar los efectos negativos de la temperatura alta, inherente al cambio climático, sobre la producción de cultivos es el uso de los recursos fitogenéticos.

Con el cambio climático actual, se considera que se superará el umbral térmico óptimo de crecimiento de las plantas; por lo tanto, es importante comprender las alteraciones en los diferentes procesos fisiológicos que provocará dicho cambio climático, como el crecimiento y desarrollo de la semilla. En la actualidad, existe poca información publicada sobre esos aspectos. Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar los atributos de calidad física y fisiológica de semilla de tomate de una variedad nativa, otra comercial y una línea experimental (L52) sometida a temperatura alta durante diferentes fases de su desarrollo, bajo el supuesto que la temperatura alta afectará de forma negativa la calidad física y fisiológica de la semilla de tomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo durante el ciclo primavera-verano 2020 en un invernadero tipo túnel con ventana cenital y cubierta de polietileno blanco-lechoso (200 m²), ubicado en Texcoco, México (19° 27' 51" LN y 98° 54' 15" LO, a 2250 msnm).

Material genético

Se utilizaron tres genotipos: 1) la variedad Money Maker (MM) de origen europeo, considerada como referencia mundial en estudios de tomate (Ruiz-Nieves *et al.*, 2021a), cuya planta es de crecimiento indeterminado y sus frutos son tipo bola; 2) una variedad nativa denominada Campeche 40 (C40) del programa de Mejoramiento Genético del Colegio de Postgraduados, de hábito de crecimiento indeterminado y fruto arriñonado, que es originaria de Campeche (clima cálido-húmedo); y 3) la línea L52 (línea materna del híbrido experimental L52 × L47), cuyas plantas son de crecimiento determinado y los frutos son tipo bola, esta línea es del programa de mejoramiento genético de la Universidad Autónoma Chapingo y sus orígenes geográficos son del noreste de México, de un clima cálido semi-seco.

Manejo agronómico

La siembra se realizó el 29 de febrero de 2020 en charolas de poliestireno de 60 cavidades, con sustrato peat-moss (Premier, Sphagnum, Canadá). El riego se hizo sólo con agua los primeros 15 d, después se realizó con Ultrasol inicial (Micro-Mix, Holanda) disuelto al 1 % hasta el momento del trasplante, el cual se realizó a los 45 d después de la siembra. Las plántulas se trasplantaron en macetas de polietileno de 40 × 50 cm, con una mezcla de turba (Sunshine No. 3) y tezontle (30:70 v/v) esterilizada con vapor de agua. El manejo agronómico del cultivo se realizó de acuerdo con las prácticas comerciales de la zona, la densidad de plantación fue de 3.5 plantas m⁻². Una vez realizado el trasplante, la fertilización se realizó con solución nutritiva Steiner (1984) al 100 %, adecuada a cada etapa fenológica del cultivo, con conductividad eléctrica de 2.2 µS cm⁻¹ g⁻¹ y pH de 5.5 a 6. Los brotes laterales de las plantas fueron eliminados conforme aparecieron para dejar un solo tallo principal. Cuando se presentaron hojas senescentes, éstas fueron removidas; esta práctica se realizó cada 15 d. Los racimos se ralearon para mantener seis frutos por racimo.

El invernadero fue dividido en dos secciones: un compartimento de TA se acondicionó con un sistema de calefacción y circulación de aire, y la otra sección de temperatura control (TC) sólo contó con sistema de ventilación. La sección del invernadero con calefacción fue equipada con cuatro calentadores eléctricos programados para elevar la temperatura entre 3 y 4 °C de 8:00 a 18:00 h. La temperatura del aire dentro de cada condición se registró con sensores Hobo MX100 (Onset Computer Corporation, Bourne, Massachusetts, EUA) durante todo el experimento. Los sensores se programaron para realizar mediciones cada 15 min y con los datos se obtuvieron promedios diarios. Después del trasplante y hasta la antesis del cuarto racimo, todas las plantas crecieron en la condición de temperatura control (TC).

Diseño experimental y tratamientos

El experimento se estableció en un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones bajo un arreglo factorial de 15 tratamientos conformado por cinco niveles del factor etapas de aplicación de TA y tres variedades. La unidad experimental consistió de un grupo de 20 plantas. Para los diferentes niveles del factor aplicación de temperatura alta (TA) se usaron los frutos del cuarto racimo que se trasladaron desde el momento indicado hasta la cosecha de sus semillas, de la siguiente forma: T1, plantas trasladadas en el momento de antesis a TA (0 días después de antesis, DDA); T2, plantas seleccionadas 15 DDA y trasladadas a TA; T3, plantas

trasladadas 30 DDA a TA; T4, plantas trasladadas 45 DDA a TA; TC, plantas que no fueron trasladadas a TA (testigo).

Recolección y beneficio de la semilla

Para la obtención de semilla de este experimento los frutos del cuarto racimo fueron cosechados en estado rojo maduro, Grado 6 (Wan *et al.*, 2018). En la variedad C40 la madurez ocurrió a los 56 d DDA, en MM a los 61 DDA y en L52 a los 65 DDA, en promedio. La recuperación de las semillas se realizó de forma manual con la utilización de 20 frutos bajo el método de fermentación, la pulpa y jugo de los frutos se dejaron fermentar por 48 h, pasado este tiempo la semilla se lavó con agua corriente mediante una esponja de fibra suave y un escurridor para retirar restos de mucílago. Las semillas limpias se dejaron secar en toallas de papel a temperatura ambiente (25 °C) durante tres semanas; posteriormente, fueron depositadas en sobres de papel y guardadas en un frasco de vidrio con cierre hermético grado laboratorio conteniendo perlas de sílica gel a 4 °C hasta su utilización dos meses después.

Evaluación de variables respuesta

Para evaluar la calidad física de semilla se contó el número de semillas por fruto (NSP) en 20 frutos. El contenido de humedad (CH) se determinó en cuatro repeticiones de una muestra de 0.5 g de semilla previo al análisis de laboratorio, las semillas se secaron en una estufa convencional (3480 Thelco®, Thermo Electron Corporation, Marietta, Ohio, EUA) a 103 °C durante 17 ± 1 h. El peso de mil semillas (PS) se obtuvo con el procedimiento estándar de la ISTA (2021), se utilizaron cuatro repeticiones conformadas por ocho muestras de 100 semillas, se pesaron en una balanza PA2202 (Ohaus, China), con precisión de 0.001 g, multiplicando el promedio por 10. El largo (LS) y ancho (AS) de semilla se midieron en cuatro repeticiones de 100 semillas mediante procesamiento de imágenes con el programa ImageJ®; para ello, las semillas se escanearon en una impresora multifuncional (CANON g3100 Pixma, Melville, New York, EUA), donde se capturaron imágenes de 1200 dpi.

Para evaluar la calidad fisiológica de la semilla se realizó una prueba de germinación (G). Se sembraron cuatro repeticiones, cada una constituida por 25 semillas en cajas de plástico (11 × 11 × 3.5 cm) sobre una capa de toallas de papel 'sanitas' y se regaron con agua destilada, se colocaron en una cámara de germinación (SD8900, Seedburo®, Des Plaines, Illinois, EUA) a 25 °C y luz constante. Después de 14 d se determinó el porcentaje de semillas germinadas (G) y muertas (SM) (ISTA, 2021). También se determinó la velocidad de emergencia (VE) de la radícula mediante conteos diarios; con los valores

obtenidos se calculó el índice de velocidad de emergencia de radículas (radículas d^{-1}) al final de la prueba, de acuerdo con la fórmula de Maguire (1962): $VE = \sum(n_i/t_i)$; donde n_i es el número de plántulas germinadas durante el intervalo t , que es el tiempo en días desde la siembra hasta el día de conteo.

La respiración (R) se midió mediante la cuantificación del CO_2 liberado por la semilla durante el proceso de germinación. La tasa respiratoria se midió en cuatro repeticiones de 25 semillas a las 72 y 120 h de iniciada la imbibición de la semilla; para esta cuantificación, se utilizó un analizador de gases infrarrojo (LI-6400, LICOR, Lincoln, Nebraska, EUA).

La conductividad eléctrica de la solución de imbibición (CE) se determinó a partir del promedio de cuatro repeticiones de 50 semillas previamente pesadas, las cuales se sumergieron en 50 mL de agua desionizada por 48 h a 25 °C; después de este periodo de imbibición, se midió la CE de la solución con un conductímetro compacto (LAQUAtwin-EC-33, Horiba, Kyoto, Japón).

Para evaluar otras variables del vigor de la semilla se realizó una prueba de envejecimiento acelerado (Navarro *et al.*, 2015); para ello, se establecieron cuatro repeticiones de 25 semillas colocadas en cajas de plástico y se sometieron a 45 °C y 100 % de humedad relativa por 72 h en estufa convencional (3480, Thelco®, Thermo Electron Corporation, Marietta, Ohio, EUA); después de este tratamiento, las semillas se sembraron en una prueba de germinación similar a la descrita anteriormente, en la que se evaluaron la germinación (GEA), las semillas muertas (SMEA) y la velocidad de emergencia de la radícula (VEEA).

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se realizó análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) con los paquetes estadísticos InfoStat Ver 2013 (Universidad Nacional de Córdoba, Argentina) y R, además de su entorno de desarrollo integrado RStudio ver. 3.6.1. Con el objeto de normalizar los datos de las variables medidas en porcentaje, previo al análisis de varianza, se transformaron los resultados mediante la función arco seno $\sqrt{x}/100$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones de temperatura

Las condiciones de temperatura del aire de los tratamientos fueron las siguientes: la temperatura máxima promedio (TMP) en TC fue de 35.2 ± 3.1 °C y en TA de 38.6 ± 3.1 °C; es decir, la temperatura del micro-ambiente TA fue

superior en 3.4 °C. La temperatura promedio nocturna para las dos secciones de invernadero fue de 15.2 °C (Cuadro 1).

La temperatura promedio máxima (TPM) de TC y TA superó por 10.2 °C y 13.6 °C respectivamente a la temperatura óptima (25 °C) reportada para el crecimiento del cultivo de tomate (Islam, 2011), y la temperatura media nocturna (15 °C) fue superior sólo en 0.2 °C a la de ambos tratamientos. De acuerdo con Ruiz-Nieves *et al.* (2021a), la temperatura nocturna es determinante en la calidad del fruto de tomate, la máxima calidad del fruto se alcanza con 15 °C, mientras que no existe información para alcanzar la máxima calidad de la semilla.

Calidad física de la semilla

El contenido de humedad de las semillas (CH) de todos los tratamientos fue en promedio de $7.2 \pm 0.3\%$. De acuerdo con Taylor (2020), después de la cosecha, el CH de la semilla disminuye hasta lograr el equilibrio dinámico con el ambiente que lo rodea, en este experimento la semilla de todos los tratamientos fue acondicionada y almacenada de la misma forma, por lo que su contenido de humedad fue similar. Este porcentaje fue clasificado como bajo y se considera que no interfirió en el desempeño de las otras variables, debido a que la semilla de tomate es de tipo ortodoxa (ISTA, 2021).

Las fuentes de variación resultaron significativas en todas las variables de calidad física, excepto para número de semillas por fruto (NSP) en el factor temperatura. Esto último indica que las etapas de aplicación de temperatura alta no indujeron cambios en los valores de NSP, lo que podría deberse a que la temperatura máxima diurna (38.6 °C) no se alcanzó durante todas las horas del día, y por la noche no superó los 20 °C en el periodo de desarrollo de la semilla, ya que, de acuerdo con Peet (2009), temperaturas diurnas permanentes superiores a 35 °C y nocturnas arriba de 21 °C reducen drásticamente la formación de semillas de tomate disminuyendo el NSP.

El NSP fue mayor ($P \leq 0.05$) en las variedades C40 y MM (99 semillas por fruto) con respecto a la L52 (53.3 semillas por fruto) (Cuadro 2). La interacción $V \times TA$ fue estadísticamente significativa para NSP únicamente en la variedad nativa C40.

La variedad MM produjo la semilla más pesada (PS = 2.97 g) y larga (3.66 mm). La semilla menos pesada fue la de C40, pero resultó la más ancha (Cuadro 2). En ambas variedades, los valores de peso de mil semillas (PS), largo de semilla (LS) y ancho de semilla (AS) se ubicaron en el intervalo de medidas encontradas por Delgado-Vargas *et al.* (2018), quienes estudiaron la semilla de cuatro

variedades de tomate, incluidas C40 y MM.

En cuanto a los tratamientos de aplicación de TA, el PS fue estadísticamente superior en el tratamiento control TC (2.95 g) y los valores más bajos se encontraron en T3 y T4 (2.73 g) en promedio, lo que sugiere que la incidencia de TA en la etapa final del desarrollo de la semilla, probablemente en la fase final de acumulación de reservas, afecta negativamente el PS. En largo de semilla (LS), el tratamiento control (TC) sobresalió nuevamente, aunque fue similar estadísticamente a T2 y T4; el valor de LS de esos tres tratamientos fue de 3.65 mm en promedio. En la variable ancho de semilla el T4 fue superior estadísticamente y similar nuevamente a TC (2.69 mm en promedio) (Cuadro 2). Así, es posible considerar que el tratamiento de temperatura control, cuya temperatura máxima promedio fue 3.4 °C menor que en TA, produjo semillas con masa y dimensiones mayores; ésto pudo deberse a que la temperatura alta puede disminuir el periodo de llenado de la semilla, y por tanto su masa final,

Cuadro 1. Temperatura del aire registrada durante el desarrollo de las semillas en los tratamientos estudiados. Los datos son el promedio \pm la desviación estándar. La sección del invernadero con el tratamiento de temperatura alta fue calentada de 8:00 a 18:00 horas.

Temperatura	Control (°C)	Alta (°C)
Máxima	35.2 \pm 3.1	38.6 \pm 3.1
Mínima diurna	19.1 \pm 2.2	19.2 \pm 2.0
Promedio diurno	27.0 \pm 2.6	29.9 \pm 2.5
Promedio nocturno	15.1 \pm 2.1	15.3 \pm 2.2

Cuadro 2. Comparación de medias por factor independiente de estudio para las variables de calidad física de las semillas de tres variedades de tomate sometidas a temperatura alta (TA) en diferentes etapas de su desarrollo.

Factor/Nivel	NSP (semillas/fruto)	PS (g)	LS (mm)	AS (mm)
Variedad				
Campeche 40	99.0 a	2.70 c	3.58 b	2.67 a
Money Maker	99.0 a	2.97 a	3.66 a	2.61 b
Línea 52	53.3 b	2.77 b	3.58 b	2.61 b
DSH	25.3	0.039	0.04	0.03
Aplicación de TA				
T1	97.7 ns	2.83 b	3.59 b	2.64 bc
T2	65.6 ns	2.80 b	3.65 ab	2.60 c
T3	97.9 ns	2.73 c	3.50 c	2.54 d
T4	66.0 ns	2.74 c	3.65 ab	2.71 a
TC	88.7 ns	2.95 a	3.70 a	2.67 ab
DSH	38.3	0.05	0.06	0.05

Medias con letras iguales en las columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). NSP: número de semillas por fruto, PS: peso de mil semillas, LS: largo de semilla, AS: ancho de semilla. ns: no significativo, DSH: diferencia significativa honesta.

lo cual no se verificó en este experimento. Los resultados indican que probablemente alguno de los procesos fisiológicos involucrados en la fase de acumulación de reservas de la semilla, tales como síntesis y translocación de fotoasimilados (Taiz *et al.*, 2018) se vieron afectados negativamente por dichos tratamientos, lo cual generó semillas menos pesadas y largas.

En cuanto a los efectos de la interacción $V \times TA$, la línea L52 pareció mantener una mayor calidad física de la semilla ante las temperaturas altas, puesto que en T1 (TA desde antesis hasta maduración del fruto) se encontró un mayor PS (2.97 g) y sus valores de LS (3.74 mm) y AS (2.7 mm) estuvieron dentro del grupo más elevado, aunque también puede deberse al menor número de semillas por fruto. Por otra parte, T3 disminuyó las características físicas de la semilla produciendo el menor PS (2.71 y 2.47 g) y LS (3.6 y 3.36 mm) en MM y L52, respectivamente, al igual que en la variable AS, aunque sus valores resultaron estadísticamente iguales que los de otros tratamientos de aplicación de TA.

Germinación, respiración y conductividad eléctrica de la solución de imbibición

El factor variedades (V) tuvo efectos altamente significativos ($P \leq 0.01$) en las variables germinación (%), semillas muertas (%), velocidad de emergencia (%) y respiración (R); además, no tuvo efecto sobre la conductividad eléctrica de la solución de imbibición (CE) (Cuadro 3). La fuente de variación de etapa de aplicación de temperatura alta (TA) no tuvo ningún efecto sobre las

variables de germinación (G), semillas muertas (SM) y velocidad de emergencia (VE), pero sí tuvo efecto sobre la R y CE (Cuadro 3). Algo similar se encontró en la interacción $V \times TA$.

Los porcentajes de G fueron altos en las tres variedades (97 % en promedio), C40 y MM fueron similares estadísticamente, y superiores a la línea L52 (Cuadro 4); de igual forma, la VE fue más rápida en las semillas de C40 (8.35 radículas d^{-1}) superando a L52 (7.19 radículas d^{-1}) y MM (5.5 radículas d^{-1}).

La velocidad de emergencia es considerada como un parámetro del vigor de la semilla, una VE alta se relaciona con un mayor vigor (ISTA, 2021). La VE mayor de C40 correlacionó con la respiración de la semilla durante la germinación ($r = 0.98$); al inicio, en la variable R a las 72 h, la semilla de esta variedad mostró un valor estadístico superior que descendió en R a las 120 h, mientras que en L52 y MM los valores se incrementaron, siendo superior la respiración de L52 (Cuadro 4). Esta variable se relaciona con el vigor de la semilla, la cual es controlada por la cantidad de sustratos respirables, como el almidón. La respiración de la semilla provee la energía requerida para la germinación (Taylor, 2020), y su intensidad depende de la funcionalidad de las mitocondrias (Taiz *et al.*, 2018); por lo tanto, las semillas vigorosas requieren mayor aporte energético que las no vigorosas (Bewley *et al.*, 2013). Los valores de respiración encontrados en esta investigación se encuentran en el intervalo reportado por Ruiz-Nieves *et al.* (2021b).

La conductividad eléctrica de la solución de imbibición (CE) fue mayor en las semillas producidas en TC (19.42 $\mu S cm^{-1} g^{-1}$) y menor en el resto de los tratamientos (11.02 $\mu S cm^{-1} g^{-1}$ en promedio) (Cuadro 4), siendo inversamente proporcional a la respiración ($r = -0.9$). De acuerdo con

la ISTA (2021), al medir la conductividad eléctrica de la solución de imbibición se cuantifican los solutos liberados por las semillas, y sus valores son proporcionalmente inversos al vigor de éstas, ya que se considera que una mayor CE indica que la organización o integridad de las membranas es deficiente (Bewley *et al.*, 2013).

Envejecimiento artificial y vigor de semilla

La prueba de envejecimiento acelerado se utiliza para evaluar el vigor de semillas. El efecto de las fuentes de variación resultó significativo en las variables evaluadas en semillas envejecidas (GEA, SMEA y VEEA), excepto el efecto de la interacción $V \times TA$ sobre GEA (Cuadro 3). La germinación de semilla envejecida (GEA) y la velocidad de emergencia de esta semilla (VEEA) fue mayor en la variedad C40, lo que indica un mayor vigor de su semilla, como se mencionó anteriormente (Cuadro 4).

En cuanto al efecto de los tratamientos de temperatura sobre estas variables, se puede constatar que TC tuvo un menor GEA y VEEA (aunque similar estadísticamente a otros) y mayor SMEA, lo cual indica un menor vigor de la semilla de ese tratamiento con respecto a cualquiera de los otros que fueron sometidos a TA (Cuadro 4). Esto coincide con la CE, donde TC tuvo un valor más alto, indicando mayor daño; entonces, el vigor fue mejor en semillas producidas en TA.

Las semillas que fueron sometidas a TA en cualquier etapa de su desarrollo germinaron mejor y más rápido después de ser sometidas a la prueba de envejecimiento acelerado, lo que podría indicar que las semillas habrían adquirido mayor tolerancia a condiciones extremas de temperatura debido a la condición en que se desarrollaron, aunque este aspecto tendrá que ser estudiado detalladamente en investigaciones posteriores, como

Cuadro 3. Cuadros medios y nivel de significancia estadística del análisis de varianza de variables de calidad fisiológica de las semillas de tres variedades de tomate (Campeche 40, Money Maker y Línea experimental 52) sometidas a temperatura alta en diferentes etapas de su desarrollo.

FV	GL	G	SM	VE	R 72 h	R 120 h	CE	GEA	SMEA	VEEA
V	2	0.0033 **	0.0003 **	39.62 **	85.74 **	63.79 **	16.55 ns	0.0033 **	0.0017 **	43.75 **
TA	4	0.3261 ns	0.2882 ns	1.08 ns	3.68 *	25.41 **	170.98 **	0.0017**	0.0046 **	1.23 *
$V \times TA$	8	0.7241 ns	0.3972 ns	6.33 **	1.96 ns	11.97 **	48.2 **	0.097 ns	0.0046 **	1.15 *
Error	14	0.01	0.01	1.11	1.12	1.67	6.39	0.02	0.02	0.42

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, V: variedades, TA: fases de aplicación de temperatura alta, G: germinación, SM: semillas muertas, VE: velocidad de emergencia de la radícula, R: respiración de semillas, CE: conductividad eléctrica de la solución de imbibición, GEA: germinación después de envejecimiento acelerado, SMEA: semillas muertas después de envejecimiento acelerado, VEEA: velocidad de emergencia de la radícula después de envejecimiento acelerado. **: $P \leq 0.01$, *: $P \leq 0.05$, ns: no significativo.

también lo sugieren Delgado-Vargas *et al.* (2018).

Por otra parte, al considerar el efecto de TA sobre las variables de calidad física (peso y tamaño) de las semillas, y su influencia sobre los diferentes componentes del vigor, se muestra un efecto inverso entre ellos; de manera general, el valor de las características físicas de la semilla disminuye en TA, pero incrementa su vigor. De acuerdo con Taiz *et al.* (2018), cada proceso vegetal podría tener una temperatura máxima fisiológica diferente, por lo que en esta investigación se demostraría que el proceso de acumulación de reservas en la semilla, que determina su peso y tamaño, es afectado negativamente con el tratamiento de TA y que los procesos mediante los cuales la semilla adquiere el vigor fueron favorecidos bajo esa condición. De acuerdo con Martínez-Muñoz *et al.* (2019), el vigor de la semilla se adquiere en la fase final de su formación, en la llamada adquisición de la tolerancia a la desecación.

En la interacción V × TA para la variable VE se encontró que los tratamientos no modificaron la velocidad de emergencia de radículas en C40 y MM, pero en L52 la TA la redujo significativamente en T4. La respiración de C40 no fue afectada con ningún tratamiento de TA, para MM la R aumentó significativamente en T2 y disminuyó en T4 y TC, en tanto que L52 se vio severamente reducida en semillas que crecieron en TC. Finalmente, el porcentaje más alto de

semillas muertas (SM) se encontró en la línea L52 con el tratamiento TC. La VEEA fue afectada en C40, la cual en el T3 aumentó y en T4 se redujo. En semillas de L52 la VEEA fue mayor con T1 y estadísticamente menor con TC.

CONCLUSIONES

Las variables de calidad fisiológica de la semilla resultaron favorecidas por la temperatura alta en la etapa de formación de fruto; en contraste, las variables de calidad física fueron afectadas negativamente. Las semillas de la variedad nativa Campeche-40 fueron más vigorosas, a pesar de ser menos pesadas y largas que las semillas de la variedad Money Maker y la línea experimental L52.

BIBLIOGRAFÍA

- Bewley J. D., K. J. Bradford, H. W. M. Hilhorst and H. Nonogaki (2013) *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy*. Third edition. Springer. New York, USA. 392 p.
- Bugbee B., and J. W. White (1984) Tomato growth as affected by root-zone temperature and the addition of gibberellic acid and kinetin to nutrient solutions. *American Society for Horticultural Science* 109:121-125, <https://doi.org/10.21273/JASHS.109.1.121>
- Delgado-Vargas V. A., J. J. Magdaleno-Villar, O. J. Ayala-Garay and D. Garfias-Sánchez (2018) Seed quality of three native tomato varieties and a commercial one produced under high temperatures. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 24:215-227, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.04.009>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015) *La diversidad genética: una herramienta secreta para luchar contra el cambio climático*. Organización

Cuadro 4. Comparación de medias por factor independiente de estudio para variables de calidad fisiológica de las semillas de tres variedades de tomate, sometidas a temperatura alta (TA) en diferentes etapas de su desarrollo.

Factor/Nivel	G (%)	SM (%)	VE (radículas por día)	R 72 h (nmol CO ₂ g ⁻¹ s ⁻¹)	R 120 h (nmol CO ₂ g ⁻¹ s ⁻¹)	CE (μS cm ⁻¹ g ⁻¹)	GEA (%)	SMEA (%)	VEEA (radículas por día)
Variedad									
Campeche 40	99.20 a	0.60b	8.35 a	7.29 a	6.64 b	13.25 ns	99.00 a	0.80 b	5.94 a
Money Maker	97.00 ab	2.10 b	5.55 c	3.35 c	4.26 b	11.65 ns	96.00 ab	4.00 ab	3.07 c
Línea 52	95.80 b	4.40 a	7.19 b	6.42 b	7.75 a	13.2 ns	92.40 b	7.20 a	3.88 b
DSH	2.3	2.2	0.80	0.81	0.98	1.93	3.83	3.61	0.49
Aplicación de TA									
T1	98.67 ns	1.83 ns	6.75 ns	6.25 a	6.44 a	10.50 b	99.00 a	1.00 b	4.41 ab
T2	98.67 ns	1.00 ns	6.88 ns	5.89 ab	7.68 a	11.58 b	99.00 a	1.00 b	4.38 ab
T3	97.00 ns	2.67 ns	7.53 ns	6.08 ab	6.77 a	11.08 b	96.67 a	3.33 b	4.68 a
T4	96.33 ns	3.00 ns	6.98 ns	5.23 ab	6.4 a	10.92 b	95.67 a	4.33 b	4.19 ab
TC	96.67 ns	3.33 ns	6.99 ns	4.98 b	3.78 b	19.42 a	88.67 b	10.33 a	3.81 b
DSH	3.49	3.1	1.21	1.22	1.49	2.92	5.79	5.46	0.75

Medias con letras iguales en las columnas dentro de cada factor de variación no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05). G: germinación, SM: semillas muertas, VE: velocidad de emergencia de la radícula, CE: conductividad eléctrica de la solución de imbibición, R: respiración de semillas, GEA: germinación después de envejecimiento acelerado, SMEA: semillas muertas después de envejecimiento acelerado, VEEA: velocidad de emergencia de la radícula después de envejecimiento acelerado, DSH: diferencia significativa honesta, ns: no significativo.

- de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma. <http://www.fao.org/news/story/es/item/275178/icode/> (Noviembre 2022).
- Hatfield J. L. and J. H. Prueger (2015)** Temperature extremes: effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes* 10:4-10, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Islam M. T. (2011)** Effect of temperature on photosynthesis, yield attributes and yield of tomato genotypes. *International Journal of Experimental Agriculture* 2:8-11.
- ISTA, International Seed Testing Association (2021)** International Rules for Seed Testing International Seed Testing Association. Bassersdorf, Switzerland. 429 p.
- Maguire J. D. (1962)** Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science* 2:176-177, <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- Martínez-Muñoz M., O. J. Ayala-Garay, V. H. Aguilar-Rincón, V. Conde-Martínez and T. Corona-Torres (2019)** Seed quality and LEA-protein expression in relation to fruit maturation and post-harvest storage of two chilies types. *The Horticulture Journal* 88:245-252, <https://doi.org/10.2503/hortj.UTD-044>
- Navarro M., G. Febles and R. S. Herrera (2015)** Vigor: essential element for seed quality. *Cuban Journal of Agricultural Science* 49:447-458.
- Peet M. M. (2009)** Physiological disorders in tomato fruit development. *Acta Horticulturae* 821:151-160, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.821.16>
- Pérez-Díaz F., M. L. Arévalo-Galarza, L. J. Pérez-Flores, R. Lobato-Ortiz y M. E. Ramírez-Guzmán (2020)** Crecimiento y características postcosecha de frutos de genotipos nativos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 43:89-99, <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.89>
- Pichardo G. J. M., O. J. Ayala G., V. A. González H., C. M. Flores O., J. A. Carrillo S., A. Peña L., ... y G. García S. (2010)** Calidad fisiológica, ácidos grasos y respiración en semillas de tomate de cáscara deterioradas artificialmente. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:231-238, <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.3.231>
- Razifard H., A. Ramos, A. L. Della Valle, C. Bodary, E. Goetz, E. J. Manser, ... and A. L. Caicedo (2020)** Genomic evidence for complex domestication history of the cultivated tomato in Latin America. *Molecular Biology and Evolution* 37:1118-1132, <https://doi.org/10.1093/molbev/msz297>
- Ruiz-Nieves J. M., O. J. Ayala-Garay, V. Serra, D. Dumont, G. Vercambre, M. Génard and H. Gautier (2021a)** The effects of diurnal temperature rise on tomato fruit quality. Can the management of the greenhouse climate mitigate such effects? *Scientia Horticulturae* 278:109836, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109836>
- Ruiz-Nieves J. M., J. J. Magdaleno-Villar, M. G. Sanchez-Alonso, V. A. Delgado-Vargas, H. Gautier and O. J. Ayala-Garay (2021b)** Parameters of physical and physiological quality in tomato seeds produced under high temperature condition during different periods of development. *Agro Productividad* 14:45-50, <http://doi.org/10.32854/agrop.v14i05.1858>
- Singkaew J., S. Miyagawa, C. Wongs-Aree, T. Vichitsoonthonkul, S. Sokaokha and S. Photchanachai (2017)** Season, fruit maturity, and storage effect on the physiological quality of F₁ hybrid 'VTM580' tomato seeds and seedlings. *The Horticulture Journal* 86:121-131, <https://doi.org/10.2503/hortj.MI-087>
- Steiner A. A. (1984)** The universal nutrient solution. In: Proceedings of 6th International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands. pp:633-650.
- Taiz L., E. Zeiger, I. M. Møller and A. S. Murphy (2018)** Plant Physiology and Development. 6th edition, Sinauer Associates, Inc. Publishers. Sunderland, Massachusetts, USA. 761 p.
- Taylor A. G. (2020)** Seed storage, germination, quality and enhancements. In: The Physiology of Vegetable Crops, 2nd edition. H. C. Wien and H. Stutzel (eds.). CAB International. Wallingford, UK. pp:1-36.
- Wan P., A. Toudeshki, H. Tan and R. Ehsani (2018)** A methodology for fresh tomato maturity detection using computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture* 146:43-50, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.011>