

Potencial genético en tomate para rendimiento y resistencia a *Fusarium oxysporum* f sp *lycopersici*

Genetic potential in tomato for yield and resistance to *fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici*



Odilón Gayosso-Barragán^{1*}, Alfonso López-Benítez²,
Fernando Borrego-Escalante², José Espinoza-Velázquez²

Maestría en Ciencias en Fitomejoramiento^{1*}, Departamento de Fitomejoramiento², Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista 25315, Saltillo, Coahuila, México. gayosso_0188@yahoo.com.mx.

(*Autor responsable)

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue estimar la Aptitud Combinatoria (AC) en siete líneas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y sus 21 híbridos F₁ para características agronómicas importantes, e identificar niveles de resistencia a la raza 3 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol). El trabajo se realizó en un invernadero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Buenavista, Saltillo, durante los ciclos agrícolas O-I 2013 y P-V 2014. Los efectos genéticos se analizaron con el método 2, modelo I, de Griffing (1956); se estimó un índice de enfermedad para determinar el avance y la respuesta de los progenitores y sus cruces F₁ a Fol, mediante el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE). Se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) para los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) para diámetro ecuatorial, diámetro polar, peso promedio de fruto, número de frutos por planta, peso de frutos por planta y rendimiento. Los valores más altos de ACG y ACE para rendimiento se observaron en las líneas D4, D3, K3 y en los híbridos K3 x D4, R1 x Y53, D3 x IR13 y F3 x Y53. Los efectos de tipo no aditivo (ACE) se observaron en mayor proporción que los efectos aditivo (ACG). La línea D3 presentó buena aptitud combinatoria para rendimiento y resistencia a Fol, por lo que puede utilizarse en un programa de mejoramiento genético para estas características.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum*, resistencia genética, aptitud combinatoria

ABSTRACT

The objective of this study was to estimate the combining ability (AC) of seven lines of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and their 21 F₁ hybrids for important agronomic traits and to identify levels of resistance to race 3 of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol). The work was carried out in a greenhouse of the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), at Buenavista, Saltillo, Coahuila, Mexico, in the agricultural cycles autumn-winter 2013 and spring-summer 2014. Genetic effects were analyzed using the method 2 model I of Griffing (1956). A disease index was estimated to determine the reaction of parents and F₁ crosses to Fol by means of the area under the disease progress curve (AUDPC). Significant differences were observed ($p \leq 0.01$) in general combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA) for equatorial diameter, polar diameter, fruit weight, number of fruit per plant, weight of fruit per plant and yield. The highest values of GCA and SCA for yield were observed in the lines D4, D3, K3 and in the hybrids K3 x D4, R1 x Y53, D3 x IR13 and F3 x Y53. The not additive effects (SCA) were observed in greater proportions than the additive effects (GCA). Line D3 showed good combining ability for yield and resistance to Fol and therefore may be used in a genetic improvement program to improve these traits.

Key words: *Solanum lycopersicum*, genetic resistance, combining ability

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza más difundida en todo el mundo y la de mayor valor económico; su demanda aumenta continuamente y, por lo tanto, su cultivo, producción y comercio. En el rubro de la producción, México ocupó en 2013 el undécimo lugar con 2.7 millones de toneladas y una superficie sembrada de 48,234 ha. En el mismo año, el promedio general de rendimiento se calculó en 57.21 t ha⁻¹, y los principales estados productores fueron: Sinaloa con 983,288 t, Baja California con 196,452 t, Zacatecas con 143,905 t, San Luis Potosí con 14,108 t, y Jalisco con 134,436 t (SAGARPA-SIAP, 2013).

Este cultivo tiene una trascendencia social muy importante, puesto que una parte considerable de la población económicamente activa se encuentra relacionada directa o indirectamente con este cultivo, además de ser fuente de empleo para un importante número de familias en México. El comercio internacional del tomate se concentra principalmente en Estados Unidos de América y en la Unión Europea. En el caso de EE.UU., sus importaciones provienen de México y de Canadá (Lucero *et al.*, 2012).

Al tomate, como a todos los cultivos, lo afectan diferentes factores que limitan su producción y, por ende, su rentabilidad. Entre los factores más importantes que perjudican el desarrollo normal de este cultivo se encuentran las enfermedades de tipo infeccioso provocadas por hongos, las cuales se presentan en la mayoría de las zonas tomateras de México.

Una de las enfermedades más importantes es la marchitez vascular que causa el *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder y Hansen, responsable de pérdidas en los rendimientos de hasta 60%, ya que afecta también la calidad del producto (Amaral *et al.*, 2008). Aun cuando el hongo tiene una gran capacidad genética para generar variantes en apariencia y coloración de las colonias, así como en la producción de microconidios y clamidosporas (Zunilde y Sanabria, 2001), a la fecha solamente se han generado tres razas fisiológicas, las cuales se distinguen por su virulencia en materiales diferenciales de tomate que contienen distintos genes de resistencia (Cai *et al.*, 2003).

El uso de cultivares resistentes es un método de control barato, seguro, no contaminante y confiable para controlar las enfermedades en la producción agrícola (Oyervides, 1999). En tomate, este método es el más satisfactorio para el control de la enferme-

dad (Blancard, 1997), por lo que encontrar variedades de tomate capaces de resistir los daños causados por esta enfermedad, es una de las soluciones más importantes. En mejoramiento de plantas, las cruza dialélicas han sido muy empleadas para encontrar progenitores que muestren parámetros sobresalientes en cuanto a aptitud combinatoria, respecto de caracteres agronómicos importantes (Dorantes *et al.*, 2008).

Entre los diseños genéticos de apareamiento que más se utilizan para encontrar genotipos con características sobresalientes por su aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE), están los propuestos por Haynman (1954), Griffing (1956), Gardner y Eberhart (1966). Mediante estos diseños el mejorador logra una mayor eficacia, pues le permite seleccionar líneas o genotipos de buen comportamiento promedio, provenientes de una serie de cruzamientos dialélicos (Gutiérrez *et al.*, 2004).

En un estudio sobre potencial genético en siete líneas de tomate (*S. lycopersicum* L.), Guerra (2010) determinó que los efectos de aptitud combinatoria general fueron superiores a los de aptitud combinatoria específica, con lo que logró identificar el método de mejoramiento más adecuado para las líneas progenitoras.

Con base en parámetros genéticos para rendimiento y resistencia a *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol), Hernández (2013) seleccionó genotipos de tomate (*S. lycopersicum* L.), y encontró una gran variabilidad con características sobresalientes de aptitud combinatoria general y específica para la selección y avance en la siguiente generación.

La presente investigación se planteó con el objetivo de estimar la ACG y la ACE en siete líneas de tomate y sus cruza en relación con características agronómicas importantes para el rendimiento, así como para resistencia a la raza 3 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol).

MATERIALES Y MÉTODOS

El material genético que se utilizó en este trabajo se constituyó de líneas generadas en el área de Fisiotécnica de la UAAAN, además de las 21 cruza F1 directas, de acuerdo con un diseño dialélico que involucró a los progenitores (Cuadro 1).

La siembra de los siete progenitores se realizó en un invernadero, en charolas de poliestireno de 200 cavidades rellenas de *peat-moss*, en septiembre de

2013. Se trasplantaron cinco plantas por cada progenitor 40 días después de la siembra, en macetas de cuatro litros de capacidad, las cuales se colocaron en el mismo invernadero. Para facilitar el proceso de cruzamientos, se establecieron dos fechas de siembra con un intervalo de tiempo de 15 días. La aplicación del agua de riego se realizó de forma manual: un litro por planta tres veces por semana en las primeras etapas, que se aumentó a cinco veces en la etapa de floración y amarre de fruto. Los 21 híbridos se obtuvieron mediante la metodología propuesta por Argerich y Gaviola (1995).

La siembra de los 28 materiales (cruzas y progenitores) se realizó en charolas de poliestireno en invernadero; el trasplante en campo se llevó a cabo en junio de 2014, cuando las plántulas tenían de tres a cuatro hojas verdaderas y una altura de 25 cm, en un lote experimental de la UAAAN, ubicado en Buenavista, a 25°21'18.74" N y 101° 1'48.45" O, altitud de 1780 m, con un clima de muy seco a semicálido, con precipitación de 417 mm promedio anual (INEGI, 2012).

Semanalmente se quitaron brotes axilares y se eliminaron hojas inferiores; se aplicó riego por goteo de cintilla, con goteros a una separación de 30 cm; para mantener el lote libre de malezas, el deshierbe fue manual; la aplicación de productos químicos para el control de plagas y enfermedades se realizó de manera periódica, de acuerdo con un monitoreo constante para su identificación.

Las variables evaluadas fueron: días a primer corte (DPC), que se contabilizó desde el trasplante hasta la madurez comercial de los frutos, cuando se hizo el primer corte; diámetro ecuatorial (DE), que se tomó de una muestra de cinco frutos del tercer

corte, a la que se le determinó, con un vernier manual, el diámetro ecuatorial y polar (DP); peso promedio de fruto (PPF), que se calculó a partir del peso de los frutos de las plantas centrales dividido entre el número total de frutos; peso de frutos por planta (PFP), que se obtuvo del número total de frutos por planta por el peso promedio de frutos y rendimiento (REND) en t ha⁻¹, además de la respuesta a la infección por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*.

La unidad experimental en campo fue de seis plantas, en surcos de 2 m de largo y una distancia entre surco de 90 cm, y de 30 cm entre plantas. Se evaluaron cuatro plantas centrales con competencia completa. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones.

El método 2, modelo I de Griffing (1956), que incluye progenitores y cruzas directas, se utilizó para estimar la aptitud combinatoria general y específica, con $[p(p+1)]/2$ combinaciones. El modelo para el análisis de aptitud combinatoria es:

$$X_{ijkl} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + b_k + (gb)_{ijk} + \frac{1}{bc} \sum \sum e_{ijkl}$$

Donde:

X_{ijk} = valor fenotípico observado,

μ = media general del experimento,

g_i y g_j = efecto de la a.c.g de los progenitores,

S_{ij} = efecto de la a.c.e. para el cruzamiento i x j ($S_{ij} = S_{ji}$),

b_k = efecto del bloque k,

$(gb)_{ijk}$ = efecto de la interacción entre el genotipo ij y el bloque k, y

$1/bc \sum \sum e_{ijkl}$ = efecto residual de la observación ijk.

Cuadro 1. Cruzamiento dialélico de siete genotipos de tomate y sus 21 cruzas F1 directas posibles.

Genotipo	K3	R1	F3	Y53	D4	D3	IR13
K3	K3xK3	K3xR1	K3xF3	K3xY53	K3xD4	K3xD3	K3xIR13
R1		R1xR1	R1xF3	Y53xY53	R1xD4	R1xD3	R1xIR13
F3			F3xF3	F3xY53	F3xD4	F3xD3	F3xIR13
Y53				Y53xY53	Y53xD4	Y53xD3	Y53xIR13
D4					D4xD4	D4xD3	D4xIR13
D3						D3xD3	D3xIR13
IR13							IR13xIR13

El análisis estadístico se realizó con el programa Statistical Analysis System (sas) Versión 9.0, con el programa Diallel-sas (Zhang y Kang, 2003), para los análisis de varianza y estimación de efectos; para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.

Inoculación de la raza 3 de Fol en progenitores e híbridos de tomate

Con el objetivo de encontrar posibles fuentes de resistencia a la raza 3 de *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*, previamente identificadas mediante pruebas de patogenicidad, se inocularon con materiales diferenciales los siete progenitores y la generación F1.

Las plántulas se sacaron de las celdas de las cajas germinadoras, y para mantener íntegras las raíces, se eliminó el exceso de sustrato con un suave chorro de agua, se les cortó con tijeras dos centímetros de la punta, aproximadamente, y se sumergieron tres minutos en una suspensión de 1×10^6 conidios por mL. Después de la inoculación, las plántulas se trasplantaron en charolas de polietileno de 5 L de capacidad, que contenían una mezcla de suelo estéril y *peat moss*, y se establecieron tres repeticiones de tres plantas por material, que se mantuvieron por 30 días en el invernadero, a una temperatura de $25 \pm ^\circ\text{C}$. La respuesta de las plantas se registró 20 días después de inocular Fol, con una escala de severidad de 0 a 5 según Marlatt *et al.* (1996), modificada para estimar la severidad de la enfermedad (Cuadro 2).

Con los valores de la escala asignados a las plántulas, se estimó un índice de enfermedad en porcentaje para cada uno de los progenitores y cruza mediante la siguiente fórmula:

$$IE = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right) 0.2 \right] 100$$

Donde:
 Xi = Severidad de la enfermedad en la i-ésima plántula
 n = Número de plántulas evaluadas
 0.2 = Factor de corrección para porcentajes de enfermedad

Los índices de enfermedad que se obtuvieron en las diferentes cruza y progenitores, se utilizaron para determinar el avance de la enfermedad y la respuesta de estos materiales a la inoculación del patógeno, mediante el cálculo del ABCPE, de acuerdo con la siguiente ecuación (Shaner y Finney, 1977):

$$ABCPE = \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \left(\frac{y_{i+1} + y_i}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right\}$$

Donde:
 yi es la proporción de la enfermedad en la i-ésima observación;
 t (i+1)- ti es el tiempo entre dos lecturas;
 i es el número de observaciones,
 y n es el número de valuaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observaron diferencias ($p \leq 0.01$) en genotipos (GEN) para todas las características evaluadas (Cuadro 3), excepto para días a primer corte (DPC), lo que se puede atribuir a la diversidad genética que

Cuadro 2. Escala para la evaluación de la severidad de los síntomas de la marchitez por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol) en el cultivo de tomate.

Escala	Intensidad de la enfermedad
0	Planta libre de síntomas
1	Planta ligera clorosis en hojas inferiores
2	Planta con ligera clorosis y ligera marchitez o achaparramiento
3	Clorosis moderada, marchitamiento o achaparramiento
4	Severa clorosis, marchitamiento y/o achaparramiento
5	Planta muerta

Fuente: Marlatt *et al.* [1996].

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis dialélico de siete progenitores de tomate y sus 21 cruzas, evaluados en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México en 2014.

FV	GL	DPC	DE	DP	PPF	NFP	PFP	REND
REP	2	8.36	0.78*	0.90**	1425.95**	51.15*	0.12	131.83
GEN	27	7.85	1.87**	0.63**	707.65**	110.74**	1.85**	2024.44**
ACG	6	14.82	2.47**	1.29**	1131.57**	121.24**	2.73**	2984.59**
ACE	21	5.86	1.70**	0.45**	586.53**	107.73**	1.60**	1750.11**
ERROR	54	11.66	0.25	0.12	169.48	15.22	0.14	160.06
TOTAL	110	48.57	7.09	3.41	4021.19	406.11	6.46	7051.04
C.V.		4.17	8.85	6.71	14.85	15.82	17.58	17.60

*, ** Significativo y altamente significativo al nivel de probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente. GEN, genotipos; ACG, aptitud combinatoria general; ACE, aptitud combinatoria específica; C.V., coeficiente de variación.

presentan los progenitores, los cuales hacen posible la identificación de cruzas con buenos rendimientos. Estos resultados coinciden con lo reportado por Ahmad *et al.* (2011) en siete líneas y 21 híbridos de tomate evaluados en Bangladesh. La significancia observada para genotipos permite que la subdivisión de los cuadrados medios en ACG y ACE sea válida (Marín y Lippert, 1975).

Se encontraron diferencias ($p \leq 0.01$) para los efectos de ACG y ACE para todas las características evaluadas, excepto para DPC, lo anterior indica la importancia de la acción de efectos aditivos y no aditivos de los genes en la herencia de estos caracteres para el cultivo de tomate. Estos resultados coinciden con Bhatt *et al.* (2001), Hannan *et al.* (2007) y Saleem *et al.* (2013).

La contribución a la varianza del rendimiento atribuible a los genotipos está constituida por 32.76% de efectos aditivos (ACG) y 67.76 % de efectos no aditivos (ACE). Esta superioridad de los efectos no aditivos sobre los aditivos puede ser debido a la varianza de desviaciones de dominancia, como antecedente genético de la manifestación de la heterosis resultante de las combinaciones híbridas entre los progenitores.

Para peso de frutos por planta (PFP), número de frutos por planta (NFP) y peso promedio de fruto (PPF), los efectos de tipo no aditivo fueron mayores que los aditivos, por lo que en un programa de mejoramiento para estas características se recomienda realizar mejoramiento por hibridación; sin embargo, se sugiere explotar primero la varianza genética aditiva por selección, y después la varianza no aditiva

por hibridación. La estrategia de mejorar por selección, hibridación, o por selección seguida por hibridación, depende de la proporción que representa la varianza aditiva y la de dominancia de la población estudiada, respecto a la variación genética total (Reyes *et al.*, 2004).

Estimación de los efectos de aptitud combinatoria general (ACG)

Los efectos de ACG son un reflejo de la aptitud de los progenitores para expresar un carácter en la progenie. Los genotipos D4, R1 y D3 presentaron los efectos negativos más altos sin diferencia significativa para la variable DPC (Cuadro 4), lo que indica que estos progenitores fueron los más precoces. Hernández (2013) encontró valores negativos para esta misma característica en las líneas de tomate de hábito indeterminado evaluadas en campo.

Los genotipos IR13 y R1 mostraron los efectos positivos más altos con diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) y significativas ($p \leq 0.05$), respectivamente, para diámetro ecuatorial; lo anterior no coincide con Gabriel *et al.* (2013), quienes obtuvieron valores de 3.083 y 2.249 de ACG para esta característica en siete líneas de tomate evaluadas bajo condiciones de invernadero.

Para número de frutos por planta (NFP), la línea D4 y la K3 presentaron los valores positivos más altos, con diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Ravindra *et al.* (2013) reportan resultados similares para esta característica en trece líneas de tomate evaluadas para componentes de rendimiento. Yadav *et al.* (2013) reportaron valores de aptitud combinatoria

Cuadro 4. Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) de siete líneas de tomate, evaluadas en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, en 2014.

Genotipo	Variables evaluadas						
	DPC	DE	DP	PPF	NFP	PFP	REND
K3	0.02	-0.30**	-0.11	-4.07	1.59*	0.07	2.49
R1	-0.31	0.18*	-0.06	0.25	-1.03	-0.06	-2.31
F3	0.61	-0.06	0.02	-3.10	-0.66	-0.15*	-5.18*
Y53	0.61	-0.10	-0.09**	3.77	-0.55	0.02	0.87
D4	-0.75	-0.31**	0.47**	11.39**	3.03**	0.54**	17.89**
D3	-1.05	0.04	-0.16	0.74	1.11	0.10	3.34
IR13	0.87	0.55**	-0.06	-8.97**	-3.48**	-0.51**	-17.10**

*, ** Significativo y altamente significativo al nivel de probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente.

general de 5.89 con diferencias altamente significativas de diez líneas, en un estudio genético de heterosis para componentes de rendimiento de tomate.

Los efectos positivos más altos y diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) se observaron en la línea D4 para las siguientes variables: diámetro polar (DP), peso promedio de fruto (PPF), peso de frutos por planta (PFP) y rendimiento (REND), lo que indica que es una buena fuente de germoplasma para desarrollar programas futuros de mejoramiento y que contiene genes de efectos aditivos que se expresan favorablemente para estas características. Premalakshme *et al.* (2005) encontraron diferencias altamente significativas en los efectos de aptitud combinatoria general para las mismas características en seis líneas de tomate de origen diverso. Guerra (2010) reportó valores más altos y con diferencias muy significativas en la línea IR10 para las características rendimiento y longitud de fruto.

Estimación de los efectos de aptitud combinatoria específica (ACE)

Los efectos de ACE representan las desviaciones del comportamiento predicho con base en un modelo simple aditivo y reflejan los efectos genéticos no aditivos. La estimación de los efectos de ACE (sij) de las cruza dialélicas (Cuadro 5) en días a primer corte: (DPC) K3xY53 y R1xD4, mostraron el más alto efecto negativo sin diferencias significativas, con valores de -2.027 y -1.99, respectivamente, lo que indica que estos híbridos son los más precoces con menos días a primer corte.

El híbrido F3 x IR13 mostró los valores positivos más altos, con diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) para las variables diámetro ecuatorial (DE) y diámetro polar (DP); en tanto que en las cruza Y53 x IR13, F3 x D3 para diámetro polar (DP), también se observaron valores positivos altos con diferencias significativas ($p \leq 0.01$). Para número de frutos por planta (NFP) y peso de frutos por planta (PFP), las cruza K3 x D4 y R1 x Y53 tuvieron los valores positivos más altos, con diferencias de ($p \leq 0.01$); resultados similares fueron reportados por Premalakshme *et al.* (2005). Los valores positivos más altos con diferencias significativas para la variable de peso promedio de frutos se observaron en las cruza K3 x D3 y R1 x Y53, que son superiores a los reportados por Ravindra *et al.* (2013).

Nueve de los 21 híbridos evaluados mostraron efectos de ACE positivos para rendimiento, de los que se destacaron por sus valores elevados las cruza: K3 x D4 (60.09) y R1 x Y53 (43.54). El alto rendimiento de una cruza pudo deberse a la suma de efectos aditivos de los genes de ambos progenitores, o bien, a los efectos de interacción de los alelos dominantes de un progenitor con los alelos recesivos del otro progenitor (Falconer, 1981). Las cruza con los valores negativos más altos con diferencias altamente significativas REND fueron: Y53 x D3 y Y53 x D4. García y Vallejo (1990) señalan que los efectos negativos de ACE son los responsables de que los progenitores superiores originen híbridos inferiores o viceversa, debido a los complejos sistemas de interacción, especialmente complementación, entre los genes responsables de la manifestación del carácter.

Cuadro 5. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) de 21 híbridos F1 de tomate, evaluados en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México en 2014.

Cruza	Variables evaluadas						
	DPC	DE	DP	PPF	NFP	PFP	REND
K3xR1	0.56	0.29	0.10	11.66	-0.88	0.12	4.31
K3xF3	-0.69	0.42	0.14	5.80	-3.92	-0.21	-6.97
K3xY53	-2.02	0.26	-0.10	-13.94	1.62	-0.24	-7.93
K3xD4	1.00	0.15	0.07	13.46	13.37**	1.82**	60.09**
K3xD3	1.30	0.50	0.09	15.91*	1.62	0.57**	18.97**
K3x1R13	-0.62	-0.44	0.27	4.38	-4.77*	-0.29	-9.84
R1xF3	-0.02	0.55*	0.16	7.24	2.03	0.35	11.56
R1xY53	-1.69	0.54*	0.31	15.77*	9.25**	1.32**	43.54**
R1xD4	-1.99	0.21	0.07	-5.95	1.00	-0.11	-3.76
R1xD3	1.63	0.08	-0.14	-11.86	-3.07	-0.54**	-18.07**
R1x1R13	-0.28	-0.75**	0.40*	5.39	-2.48	-0.09	-3.04
F3xY53	0.37	0.35	-0.14	0.20	6.22**	0.56**	18.62**
F3xD4	-1.25	-0.65**	-0.21	1.34	-1.37	-0.06	-2.09
F3xD3	-0.95	-0.26	0.54**	-25.94**	3.55	-0.47**	-15.75**
F3x1R13	1.78	0.62*	0.52**	-14.07	-1.18	-0.34	-11.49
Y53xD4	-0.25	0.58*	0.23	-0.40	-8.48**	-0.95**	-31.68**
Y53xD3	0.71	0.22	-0.10	-20.18**	-10.22**	-1.23**	-40.57**
Y53x1R13	-1.21	-1.28**	0.64**	10.93	-1.96	0.04	1.46
D4xD3	0.41	0.38	0.11	5.57	2.51	0.38*	12.77*
D4x1R13	-1.50	-1.37**	0.08	-16.12*	3.77	-0.15	-5.21
D3x1R13	-1.21	-0.48	-0.20	-3.09	10.03**	0.70**	23.11**

*, ** Significativo y altamente significativo al nivel de probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente.

Estudios de cruzas dialélicas indican que las cruzas simples de alto rendimiento son aquéllas en las que cuando menos una de las líneas presenta alta ACG (gi) y entre las dos líneas ocurren altos efectos positivos de ACE (sij). Por el contrario, las cruzas simples con rendimiento bajo son aquéllas cuyas dos líneas son de baja ACG y entre ellas ocurren efectos negativos sij de alto valor absoluto Reyes *et al.* (2004). Estos estudios señalan la conveniencia de que los programas de hibridación cuenten con una base de líneas de alta ACG para que en un sistema de cruzas dialélicas se estimen los efectos gi y sij y se haga la predicción de los mejores híbridos.

Al realizar la comparación de medias mediante la prueba de Tukey, se encontró que para la variable rendimiento (REND), la línea Y53 presentó el valor más alto con 55 t ha⁻¹, seguido de D4 con 54 t ha⁻¹.

Respecto a la mejor cruza: Y53 x D4, con 93 t ha⁻¹, presentó el mayor rendimiento comparado al total de las cruzas evaluadas, lo cual se debió a que uno de sus progenitores fue el que mostró el mejor rendimiento y la mayor ACG, es decir, genes con efecto aditivo que influyeron para que se expresara mejor esta característica.

Respuesta de progenitores e híbridos a la infección de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*

Se observaron diferencias ($p \leq 0.01$) para genotipos, las cuales pueden atribuirse a la variabilidad presente en cada uno de los genotipos en estudio. Un parámetro epidemiológico muy utilizado en el estudio de la resistencia de las plantas a las enfermedades, es el área bajo la curva de progreso de una enfermedad (ABCPE) (Haynes y Weingartner, 2004). Este pará-

metro indica la dinámica de una epifitía mediante un solo valor. Los valores más bajos de ABCPE corresponden a los materiales con menor incidencia de enfermedad, es decir, con mayor nivel de resistencia (Escalante y Farrera, 2004).

En este estudio, los genotipos con menor incidencia de la enfermedad fueron: Y53 con 1000 y D3, con 1090 de porcentaje por día (Figura 1), lo que indica diferentes niveles de resistencia horizontal; ambos genotipos pueden elegirse para seguir un proceso de mejoramiento en el que se aprovechen los genes de resistencia a este patógeno. Hernández (2013) reporta resultados similares de resistencia en el genotipo D3.

De acuerdo con Van der Plank (1984), la resistencia horizontal no evita que las plantas sean infectadas, sino que reduce la tasa del incremento de la enfermedad de cada uno de los lugares de infección en la planta y, por lo tanto, retrasa la propagación de la enfermedad y el desarrollo de las epifitias en el campo.

Para la respuesta de la generación F1 a la inoculación de Fol, se observaron diferencias ($p \leq 0.01$) entre genotipos y repetición, las cuales pueden atribuirse a que son cruzas generadas entre progenitores con un moderado nivel de resistencia, y otros con completa susceptibilidad. Resultados similares re-

portó Hernández (2013) al evaluar 27 híbridos de tomate para resistencia a *Fusarium oxysporum*.

Para la evaluación de los híbridos, los valores del área bajo la curva de desarrollo de la enfermedad, indican que la cruce con menor nivel de incidencia fue K3 x D3, con 740 de porcentaje por día, seguida de Y53 x IR13 y F3 x Y53 con valores de 940 y 1020, por lo que se consideran genotipos moderadamente resistentes al hongo. Las cruzas más susceptibles al patógeno fueron: F3 x IR13, K3 x D4 y D4 x IR13, con porcentaje por días de 2300, 2170 y 2110, respectivamente (Figura 2).

CONCLUSIONES

La estimación de ACG y ACE generó información sobre el potencial de los siete progenitores estudiados y de sus cruzas para el mejoramiento genético de tomate. Los valores más altos de ACG y ACE para REND se observaron en las líneas: D4, D3, K3, y en los híbridos K3 x D4, R1 x Y53, D3 x IR13 y F3 x Y53. En la línea D3 se puede explotar su buena aptitud combinatoria, además de la resistencia que mostró a Fol, y utilizarse en un programa de mejoramiento genético para estas características.

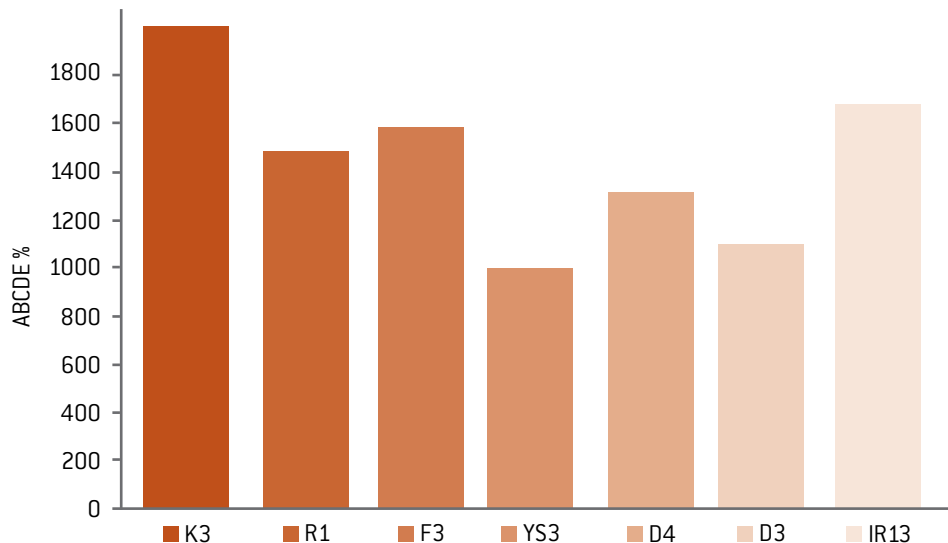


Figura 1. Área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE) de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* en siete genotipos de tomate, evaluados en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México en 2014.

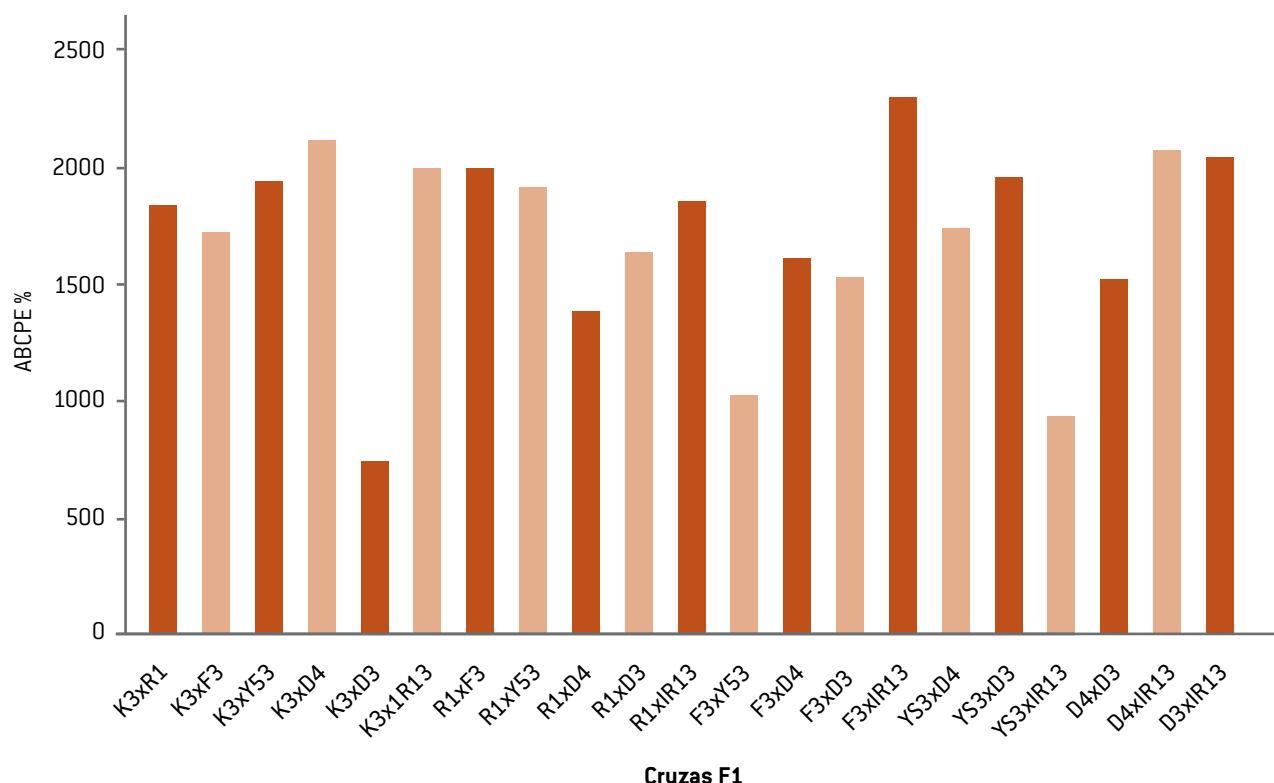


Figura 2. Área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE) de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* en de 21 híbridos de tomate, evaluados en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México en 2014.

LITERATURA CITADA

- AHMAD, S., A. K. M. Quamruzzaman y M. R. Islam. 2011. Estimate of heterosis in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Bangladesh J. Agril. Res. 36(3): 521-527.
- AMARAL, D.O.J., M. Magalhaes, L. Vilela, y M. Vanusa. 2008. Differential gene expression induced by salicylic acid and *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici* infection in tomato. Pesq Agrop Bras 43(8): 1017-1023.
- ARGERICH, C. A. y J. Gaviola C. 1995. Manual de producción de semillas hortícolas. Tomate. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pág. 29.
- BHATT, R. P., V. R. Biswasy N. Kumar. 2001. Heterosis, combining ability and genetics for vitamin C, total soluble solids and yield in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) at 1700 m altitude. Journal of Agricultural Science, Cambridge 137: 71-75.
- BLANCARD, D. 1997. A colour atlas of tomato diseases. Observation, Identification and Control. Manson Publishing, John Wiley & Sons New York, Toronto.
- CAI, G., Gale, I.R., Scheider, R.W., Kistler, H.C., Davis, R.M., Elias, K.S., and Miyao, E.M. 2003. Origin of race 3 of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* at a single site in California. Phytopathology 93:1014-1022.
- DORANTES G., J. R., F. P. Gámez V., M. A. Ávila P., A. J. Gámez V. y M. Ramírez M. 2008. Heterosis para características de fruto en chile jalapeño. 3a. Reunión Nacional de Innovación Agrícola y Forestal. Yucatán, México.
- ESCALANTE O., M., P. Farrera R. 2004. Epidemiología del Tizón Tardío (*Phytophthora infestans* Mont de Bray) de la papa en zonas productoras del estado de Táchira, Venezuela. Bioagro 16: 47-54.
- FALCONER, D. S. 1981. Introducción a la genética cuantitativa. 12ª impresión. Editorial CECSA. 430 pp.
- GABRIEL, J., E. López, J. Magne, A. Angulo, R. Luján, J. La Torre, M. Crespo. 2013. Bases genéticas de la herencia para características morfológicas, agronómicas y agroindustriales en tomate híbrido *Solanum lycopersicum* L. Journal of the Selva Andina Biosphere. Bolivia 4: 37-46.
- GARCÍA A., A. y F. A. Vallejo C. 1990. Habilidad combinatoria para el carácter producción por planta y sus componentes primarios en un cruzamiento dialélico de siete líneas de tomate Chonto (*Lycopersicon esculentum* Mill). Rev. Acta Agro. 40(1-2): 32-41.

- GARDNER, C. O. y S. A. Eberhart. 1966. Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. *Biometrics* 22: 439-452.
- GUERRA Z., L. 2010. Estimación de aptitud combinatoria general, aptitud combinatoria específica y heterosis en siete líneas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- GUTIÉRREZ R., E., A. Espinosa, A. Palomo, J. Lozano y O. Antuna. 2004. Aptitud combinatoria de híbridos de maíz para la comarca lagunera. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27(1): 7-11.
- GRIFFING, B., 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. J. Biol. Sci.*, 9: 463-493.
- HANNAN, M. M., Ahmed, M.B., Razvy, M. A., Karim, R., Khatun, M., Haydar, A., Hossain, M. y Roy, U. K. 2007. Heterosis and correlations of yield and yield components in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.), American-Eurasian J. Sci. Res. 2(2): 146-150.
- HAYMAN, B. I. 1954. The theory and analysis of diallel crosses. *Genetics* 39: 789-809.
- HAYNES, K. G. and D. Peter Weingartner. 2004. The Use of Area Under the disease progress curve to assess resistance to late blight in potato germplasm. *Amer J of Potato Res* 81: 137-141.
- HERNÁNDEZ M., R. 2013. Selección de genotipos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) con base en parámetros genéticos para rendimiento y resistencia a *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol) (Sacc.) Snyder y Hansen. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- INEGI, 2012. Perspectiva estadística Coahuila de Zaragoza. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 99 pp.
- LUCERO F., J. M., C. Sánchez V. y M. A. Almendarez. 2012. Inteligencia de mercado de tomate saladette. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México. 74 pp.
- MARIN, V. y L. F. Lippert. 1975. Combining Ability Analysis of Anatomical Components of the Dry Fruit in Chili Pepper. *Crop Science* 15: 326-329.
- MARLATT, M., J. Correll and P. Kaufman. 1996. Two genetically distinct populations of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 3 in the United States. *Plant. Dis.* 80: 1336-1342.
- OYERVIDES C., M.S. 1999. Producción y Exportación de Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en el periodo de 1995 a 1998. Buenavista, Saltillo Coahuila, México. 83 pp.
- PREMALAKSHME, V., T. Thangaraj., D. Veeraragavathatham y T. Arumugam. 2005. Heterosis and combining ability in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Veg. Sci.* 32(1): 47-50.
- RAVINDRA, K., K. Srivastava, N. Pal Singh, N. K. Vasistha, R. K. Singh y M. K. Singh. 2013. Combining Ability Analysis for Yield and Quality Traits in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Agricultural Science* 5(2): 213-218.
- REYES L., D., J. D. Molina G., M. A. Oropeza R. y E.C. Moreno P. 2004. Cruzas dialélicas entre líneas autofecundadas de maíz derivadas de la raza tuxpeño. *Rev. Fitotec. Mex.* 27(1): 49-56.
- SALEEM, M. Y., M. Asghar, Q. Iqbal, A. Rahman y M. Akram. 2013. Diallel analysis of yield and some yield components in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Pak. J. Bot.* 45(4): 1247-1250.
- SAGARPA-SIAP. 2013. Cierre de la producción agrícola por cultivo. Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Documento en línea: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> Fecha de consulta: 10 de Marzo de 2015.
- SHANER, G. and Finney R. 1977. The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in Knox. *Phytopathology* 67:1051-1056.
- YADAV, S. K., B. Singh K., D. Baranwal K. y S. Solankey S. 2013. Genetic study of heterosis for yield and quality components in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *African Journal of Agricultural Research* vol. 8(44): 5585-5591.
- ZHANG Y. y M.S. Kang. 2003. Diallel-SAS: A program for Griffing's diallel methods: Handbook of formulas and software for plant geneticists and breeders. In: Kang, M. S. (ed). FPP. New York. London. Oxford. 347 pp.
- ZUNILDE, C. L. y Sanabria, N. H. 2001. Características culturales y patogénicas en aislamientos de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* procedentes de plantaciones comerciales de tomate. *Agronomía Tropical*. 51(4): 519-530.