

Generalidades de los factores fisiológicos que determinan la adaptación del frijol a las condiciones del Caribe seco

En la actualidad la producción agrícola se enfrenta a diversos problemas, por ejemplo, a la desertificación en zonas cálidas, proceso en el que los suelos de ecosistemas áridos, semiáridos o subhúmedos secos pierden la capacidad parcial o total de desarrollar procesos biológicos, debido a diversos factores como las variaciones climáticas y las actividades humanas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005). En este sentido, se han registrado los riesgos de la producción agrícola derivados de la fase cálida de los ENOS en Centro América y Colombia, aspecto que afecta la productividad de cultivos anuales en un 35 % y las predicciones del cambio climático para la costa Caribe en cuanto al incremento de la temperatura en al menos 2 °C (Brenes & Bonilla, 2010; Lau, Jarvis, & Ramírez, 2011).

Las plantas responden de manera variable frente al calor, dependiendo de la intensidad y duración del estrés, aunque en todos los casos la respuesta se relaciona con la detoxificación de especies reactivas de oxígeno ROS, que afectan la integridad de membranas celulares y organelas (Hasanuzzaman, Nahar, Alam, Roychowdhury, & Fujita, 2013). En general, se ha identificado que la alta temperatura afecta la integridad de las membranas celulares en los cultivos (Chávez & Gutiérrez, 2017). Las temperaturas altas pueden reducir la tasa de fotosíntesis a través de cambios en la membrana, en la organización estructural y en las propiedades fisicoquímicas de los tilacoides. En este sentido, se han hecho numerosos ensayos para determinar la temperatura base del frijol, que es la mínima requerida para mantener las funciones metabólicas, en especial la expansión foliar: 10 °C, pero se han registrado valores inferiores a 8,3 °C. Así, pues, conocer el efecto de la temperatura en los cultivos es importante para determinar su influencia en el desarrollo del área foliar y la acumulación de materia seca durante el ciclo biológico de la planta (Barrios-Gómez, López-Castañeda, & Kohashi-Shibata, 2011).

El frijol presenta limitación en su productividad en zonas cálidas a causa de las altas temperaturas nocturnas mayores a 24 °C sobre la diferenciación del polen y la producción de semilla, lo que afecta el rendimiento final. Las plantas de frijol pueden alcanzar buena producción de brote, floración prolongada, abscisión floral, bajo cuajado de vainas, bajo rendimiento y granos deformados (Beebe et al., 2011).

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), al ser originario de las tierras altas de América Central y los Andes, está adaptado a las temperaturas moderadas. Las altas temperaturas durante la floración ocasionan estrés fisiológico en el frijol y abscisión excesiva de los órganos reproductivos, lo cual repercute en el rendimiento. Los efectos del estrés por calor son mayores durante la fase reproductiva respecto a la fase vegetativa en muchos cultivos, entre ellos el de frijol, y el sistema reproductor masculino es mucho más susceptible que el femenino frente al estrés por calor (Porch & Jahn, 2001). Sin embargo, el germoplasma de *Phaseolus vulgaris* presenta diversidad en la tolerancia al estrés por calor; además, puede utilizarse en programas de mejoramiento genético para zonas cálidas (Barrios-Gómez et al., 2011).

46

En este sentido, para atender los problemas de desnutrición y hambre en las zonas áridas, el programa de mejoramiento de frijol del CIAT ha desarrollado múltiples poblaciones derivadas entre parentales interespecíficos y genotipos tolerantes al calor para mejorar la productividad de *Phaseolus vulgaris* en estas zonas (Polanía et al., 2009).

La obtención de nuevos cultivares de frijoles tolerantes al calor debe superar las restricciones fisiológicas ocasionadas en la formación y viabilidad del polen. Así, se ha definido que la temperatura alta ($> 30^{\circ}\text{C}$ en el día o $> 20^{\circ}\text{C}$ en la noche) —como las observadas en el Caribe seco— durante la etapa de antesis y establecimiento del número de semillas, disminuye la producción de frijol cuando la humedad relativa es baja, ya que las temperaturas altas nocturnas tienen efectos más adversos que las temperaturas altas en

el día. Las temperaturas altas reducen la viabilidad del polen, el crecimiento del tubo polínico y la fertilización del ovario; aceleran la tasa de desarrollo de la planta y acortan el periodo de crecimiento de los órganos reproductores; además, causan excesivo aborto de flores y vainas jóvenes, aceleran el llenado del grano y reducen el número de semillas por vaina, el tamaño de semilla y el rendimiento (Barrios-Gómez et al., 2011).

Por otro lado, evaluaciones en zonas secas de México demostraron que en el cultivo de frijol la temperatura del aire se relacionó estrechamente con la temperatura del dosel del cultivo, y esta aumentó al disminuir el contenido de agua del suelo y el potencial hídrico foliar de las plantas durante la floración. Los genotipos que mantuvieron un grado más alto de turgencia conservaron la temperatura de su follaje más baja. La alta temperatura de la planta redujo el rendimiento de semilla, la biomasa aérea final, el número de vainas normales m^2 y el peso de 100 semillas (Porch & Jahn, 2001).

La termoestabilidad de la membrana celular mediante la medición de la pérdida de electrolitos por daños ocasionados a la membrana es un criterio fisiológico de selección indirecto; en el caso del frijol se identificó la floración como la etapa más sensible en frijol a este tipo de daño (Nava, 2013). Los *drought-responsive element binding factor* (DREB) son factores de transcripción asociados a la respuesta general de las plantas al estrés abiótico, como alta temperatura, frío y desecación, lo que actúa sobre la expresión de genes inducidos en especial por la ruta independiente de *aba phytohormone abscisic acid* (ABA). La variabilidad de los DREB puede asociarse a la tolerancia general a estrés abiótico (Lata & Prasad, 2011).

Se han identificado en diferentes cultivos, incluido el frijol, *quantitative trait loci* (QTL) asociados a la tolerancia al estrés por alta temperatura y por déficit hídrico. La respuesta de la planta a dichos estreses implican la expresión de genes comunes y diferentes. Específicamente, el estrés por calor implica la expresión de los genes HSF, mientras que el estrés por alta temperatura implica la expresión de los genes que codifican las proteínas LEA. No obstante, los genes que codifican la superóxido dismutasa incrementan la expresión bajo ambos estreses. En el caso del frijol, la respuesta al déficit hídrico se asoció inicialmente con cambios morfológicos en la expansión lateral de la raíz. No obstante, en la actualidad, se ha asociado con la longitud de la raíz pivotante, con los cambios en la conductancia estomática, con la viabilidad de polen y alocaión de fotosintatos a la vaina y el grano (Barrios-Gómez et al., 2011).

La investigación en frijoles de bajo consumo hídrico y altas temperaturas se ha enfocado más que nada en centro América y África. En la primera se evaluaron frijoles a 50 m s. n. m. en el sur de Honduras, Costa Rica y Salvador, donde se obtuvieron líneas de frijoles rojos pequeños tolerantes al calor y resistentes al virus del mosaico dorado de frijol común (VMDF) (Rosas et al., 2000). De igual forma, en México se identificaron genotipos de buenas calidades agronómicas y tolerancia al calor a partir de la evaluación de caracteres agronómicos, como peso de

1.000 semillas, índice de susceptibilidad a calor para rendimiento de semilla, biomasa aérea final, número de semillas/vaina, número de vainas (Barrios-Gómez et al., 2011).

Las evaluaciones en campo de adaptación de germoplasma de frijol al estrés por calor están relacionadas con vigor (biomasa del brote e índice de área foliar), estatus hídrico de la planta (temperatura del brote y conductancia estomática), movilización de fotosintatos (índice de cosecha, índice de partición a vainas), contenido de nutrientes brote/semillas y características de la raíz (Polanía et al., 2009).

Estas características tienen una variabilidad limitada en el acervo de *Phaseolus vulgaris*, por lo cual se han realizado cruces dobles y triples con *Phaseolus coccineus* y *Phaseolus acutifolius*, que conllevan la necesidad de aplicar estrategias biotecnológicas como el rescate de embriones para mantener la progenie. En este sentido, el CIAT ha desarrollado las líneas SEF, que son progenies F6 de los cruces interespecíficos con retrocruza a variedades comerciales con tolerancia moderada al estrés abiótico y buenas características comerciales de grano. También se han desarrollado las líneas SER, con características similares de tolerancia a ambientes secos y cálidos. Las líneas SER y SEF son las que actualmente se evalúan en el Caribe (CIAT, 2010; Frahm et al., 2004; Hernández & Araya, 2003) (tablas 8 y 9).

Tabla 8. Viabilidad de polen de las 36 líneas de frijol (SER y SEF) tolerantes a estrés por altas temperaturas en la primera siembra realizada en Codazzi, Cesar

Línea-surco		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total	V+NV	% de viabilidad
21-22	v	0	4	4	15	5	2	2	2	1	5	40	190	21,05
SEF4	nv	10	6	27	32	18	9	10	9	22	7	150		
15-16	v	2	5	4	2	4	7	3	5	3	1	36	203	17,73
SEF10	nv	20	8	19	18	42	9	9	11	13	18	167		
3-4	v	2	2	1	0	0	0	2	3	2	1	13	201	6,47
SEF14	nv	13	13	26	20	21	16	17	25	20	17	188		
37-38	v	20	9	26	15	12	9	3	5	10	12	121	286	42,31
SEF16	nv	34	9	38	19	7	13	15	9	12	9	165		
35-36	v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144	-
SEF22	nv	20	21	10	13	21	11	13	11	11	13	144		
17-18	v	4	17	3	4	4	1	7	6	3	9	58	241	24,07
SEF25	nv	20	52	15	14	8	9	12	16	17	20	183		
9-10	v	13	3	9	6	8	7	9	9	11	5	80	203	39,41
SEF43*	nv	18	17	19	7	14	4	11	4	13	16	123		
13-14	v	0	4	3	9	5	1	0	1	5	9	37	163	22,70
SEF52	nv	22	21	8	2	7	10	13	17	7	19	126		
7-8	v	2	2	1	0	2	7	5	4	8	1	32	252	12,70
SEF54	nv	8	45	20	11	29	18	33	31	13	12	220		
53-54	v	1	1	1	0	2	0	0	1	1	0	7	187	3,74
SEF55	nv	13	18	11	18	25	27	19	25	10	14	180		
11-12	v	4	6	11	12	2	4	6	7	7	4	63	229	27,51
SEF59	nv	24	14	27	25	11	15	11	18	11	10	166		
51-52	v	10	10	11	14	14	15	12	12	14	14	126	157	80,0
SEF60*	nv	1	2	1	2	1	1	1	10	1	10	131		
29-30	v	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	160	0,63
SEF62*	nv	22	16	20	15	12	11	25	15	11	12	159		
19-20	v	30	40	20	20	26	20	30	20	20	30	256	404	63
SEF64*	nv	19	13	15	14	16	10	22	10	14	15	148		
71-72	v	10	10	10	11	20	20	20	13	10	21	143	190	75
SER101	nv	2	5	1	2	7	0	2	10	2	16	47		
33-34	v	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	100	1,00
SER102	nv	3	1	1	2	23	22	15	6	9	17	99		

(Continúa)

| Generalidades de los factores fisiológicos que determinan la adaptación del frijol
a las condiciones del Caribe seco |

(Continuación tabla 8)

Línea-surco		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total	V+NV	% de viabilidad
43-44	v	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	141	1,42
SER109	nv	5	11	9	17	10	28	23	7	18	11	139		
23-24	v	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	3	106	2,83
SER118	nv	4	17	8	17	11	9	5	11	10	11	103		
1-2	v	1	1	0	1	1	1	0	0	0	2	7	100	7,00
SER216	nv	6	9	7	5	9	10	13	5	21	8	93		
39-40	v	6	4	5	1	5	3	1	3	1	4	33	125	26,40
SER271	nv	11	7	7	7	10	9	15	3	12	11	92		
31-32	v	19	3	7	11	18	31	16	6	54	10	175	237	73,84
SER289	nv	9	8	8	6	9	9	3	4	3	3	62		
59-60	v	9	10	11	13	7	17	11	13	11	4	106	231	45,89
SER299	nv	17	10	17	18	9	8	7	19	14	6	125		
67-68	v	6	5	6	9	6	10	6	8	14	6	76	105	72,38
SER334	nv	4	4	4	2	2	2	2	3	2	4	29		
5-6	v	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	103	0,97
SER336	nv	14	10	8	10	11	12	9	12	10	6	102		
25-26	v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	103	-
SER338	nv	12	10	12	10	12	12	7	11	8	9	103		
47-48	v	8	6	0	3	5	3	5	3	8	5	46	118	38,98
SER347	nv	9	8	7	7	5	6	5	5	8	12	72		
65-66	v	19	19	13	9	9	17	10	25	8	15	144	176	81,82
SER352	nv	1	2	2	1	3	3	2	10	3	5	32		
57-58	v	4	13	6	4	13	10	6	11	6	6	79	196	40,31
SER339	nv	8	13	12	14	14	17	10	5	7	17	117		
69-70	v	3	0	1	1	1	2	0	0	0	1	9	155	5,81
SXB747	nv	7	21	12	20	8	8	18	22	11	19	146		
135-136	v	6	7	5	3	10	11	11	10	18	4	85	155	54,84
SEN22	nv	12	4	4	11	1	1	8	13	12	4	70		
45-46	v	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	219	0,46
SMR45	nv	16	21	13	13	22	16	37	26	27	27	218		
61-62	v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	143	-
SMR113	nv	12	13	10	19	11	15	10	12	25	16	143		

(Continúa)

(Continuación tabla 8)

Línea-surco		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total	V+NV	% de viabilidad
		63-64	v	2	5	2	2	3	0	3	2	3		
SMR114	nv	12	15	13	16	16	11	19	18	13	11	144		
49-50	v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	191	-
SMR122	nv	36	15	14	18	17	27	15	11	15	23	191		
56-56	v	5	8	35	22	21	40	3	9	21	12	176	272	64,71
G122	nv	5	3	18	18	8	9	7	8	9	11	96		
205-206	v	4	17	15	15	26	10	8	12	7	14	128	224	57,14
EAP9653-16B	nv	5	3	18	18	8	9	7	8	9	11	96		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Análisis de conglomerados a partir de los datos de variables productivas bajo condiciones de calor (Centro de Investigación Motilonia) de las líneas SER y SEF

Grupo	Línea N.º	Peso de semillas × surco en gramos	Peso promedio × semillas gramos	Semillas normales	Semillas anormales	Número total de vainas × parcela	Número de plantas × parcela	Número de plantas cosechadas × parcela	Promedio vainas × plantas cosechadas
1	ALB74	12,61	0,1	50,3	0	43,7	26	5,7	4,4
1	INB841	100,1	0,4	377,7	78,7	304,7	55	31	9,8
1	SEF11	59,4	0,3	231	10	145,7	31,7	17	8,6
1	SEF16	126,8	0,4	393	184	219,7	30	18,3	12,6
1	SEF17	66,2	0,4	235,3	37,7	196,3	58,7	36,3	6,4
1	SEF29	95,2	0,8	277,7	15,7	152,3	68	38	3,9
1	SEF73	23,8	0,3	91,3	5	57,7	45,3	16,3	1,7
1	SEF74	83,3	0,4	336	19,3	187,7	58,7	42	4,6
1	SEF9	80,3	0,4	323,7	19,7	206	65,3	35,7	8,2
2	EAP9510-77	384,4	1	951	64	516,3	84,7	62,7	7,7

(Continúa)

(Continuación tabla 9)

Grupo	Línea N.º	Peso de semillas × surco en gramos	Peso promedio × semillas gramos	Semillas normales	Semillas anormales	Número total de vainas × parcela	Número de plantas × parcela	Número de plantas cose- chadas × parcela	Promedio vainas × plantas cosechadas
2	SEF10	324,8	0,5	1154,3	104	557,3	71	56	10,4
2	SEF42	309,7	0,5	999,3	30,7	491	81	52,7	9,3
2	SEF55	294,3	0,5	1128,3	63	467	69,7	55,3	8,4
2	SEF56	237,3	0,5	958,7	51,7	386,7	64,3	47	9,8
2	SEF69	240	0,4	1011,7	193,7	596,3	92,7	71	8
2	SEF70	233	0,5	953,3	111	467,7	88	74,3	6,8
3	G40001	406	0,2	2105,3	1267,3	977,7	94,7	81,7	17,9
4	RCB593	216,5	0,4	796,7	15,7	458,3	50,7	29,3	18,4
4	SEF1	178,3	0,5	693,7	52	349	77	55,3	6,2
4	SEF14	262,7	0,5	729,7	302,3	404	42	34,7	10,9
4	SEF15	226,8	0,5	609,7	292,7	436,3	68	46,3	9,1
4	SEF28	154,1	0,5	696	24,7	331,3	77	37	10,7
4	SEF44	205,2	0,5	803,7	30,3	426	51	39,7	10,7
4	SEF45	214,4	0,5	835,7	48	416	39	32	13,2
4	SEF47	232,9	0,6	734,7	73	416,3	74,3	45,3	9,5
4	SEF49	183,5	0,5	630,3	58,7	441,3	70,3	47,7	10,8
4	SEF52	219,6	0,6	764,3	75,7	512	59,7	47	11,1
4	SEF53	131,6	0,4	509	39	349	57,3	47	8
4	SEF68	145,4	0,4	559	52,3	401	88,7	51	9,1
4	SEF71	259,8	0,8	719,7	39,7	546,7	93,3	62	9,2
4	SER16	191,9	0,4	792	13,3	445,3	52	26,7	17,1
5	SEF43	333,2	0,5	1230,3	204,3	630,7	59,3	51,3	12,2
5	SEF60	424,1	0,6	1256	162	611,7	67,7	59,7	10,1
5	SEF62	318,3	0,5	1256	137	726,7	96,3	78,7	9,2
5	SEF64	351	0,5	1308,3	81,7	715	93,3	77,7	9,6

Fuente: Elaboración propia

Las variables que explican la tolerancia de los genotipos a calor son: peso promedio de semilla, semillas normales y promedio de vainas por planta cosechada (figura 6). De acuerdo con esto, los genotipos ubicados en el conglomerado número cinco presentaron los mayores valores para estas variables. Así, se encontró que estos genotipos (SEF43, SEF60, SEF62, SEF64) mostraron porcentajes de viabilidad de polen entre 39% y 80% (figura 7); por tanto, este indicador fisiológico es interesante en cuanto a la evaluación de tolerancia del frijol común a las condiciones de calor en el Caribe seco. Es importante resaltar la accesión G40001 que presentó un buen comportamiento, pero su tamaño fue muy pequeño (corresponde a un genotipo de *P. acutifolius*).



Foto: Adriana Patricia Tofiño Rivera

Figura 6. Evaluación de semillas viables como criterio de adaptación del frijol a la alta temperatura.

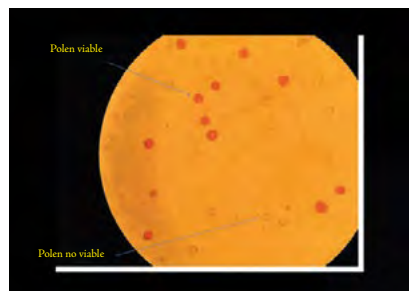


Foto: Adriana Patricia Tofiño Rivera

Figura 7. Viabilidad de polen líneas sef $6 \times 6 \times 3 \times 4$ (Centro de Investigación Motilonia), siembra de 2014 (10x).

En la costa Caribe, en época del fenómeno de El Niño, se registran volúmenes de precipitación (vp) subnormales, y con el de La Niña hay lluvias superiores a las normales. En este sentido, se produce una afectación directa sobre el frijol, ya que este disminuye su rendimiento si los vp en la primera y segunda estación lluviosa están por encima de lo normal, y aumenta si es época de veranillo (Ruiz Cabarcas & Pabón Caicedo, 2013). Además, según predicciones de modelos climáticos, la mayor parte de América Latina y el Caribe experimentará aumentos significativos de temperatura y cambios en la precipitación para el 2050. En Guatemala, Colombia y Jamaica, por ejemplo, estos cambios plantearán serios desafíos para las cadenas de suministro de alimentos frente a la creciente demanda. Dejar rezagar la producción de cultivos no solo reducirá los ingresos nacionales y el crecimiento del sector privado, sino que además pondrá en riesgo la seguridad alimentaria y los medios de vida de miles de pequeños agricultores. Los responsables de formular las políticas deben empezar desde ahora a minimizar los impactos socioeconómicos del cambio climático mediante un esfuerzo coordinado para identificar opciones proactivas de adaptación, que tengan en cuenta los diferentes grados de vulnerabilidad en todas partes, cultivos, cadenas de suministro y culturas (Lau et al., 2012). Asimismo, se ha documentado el efecto del incremento de la temperatura sobre el índice de desertificación de suelos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam] et al., 2014).

Específicamente, en el Caribe se ubican varios departamentos colombianos con mayor grado de afectación por desertificación: Atlántico y Guajira con el 75%, seguido de Magdalena,

Sucre y Córdoba con 50-70% de su extensión, lo cual limita su productividad agropecuaria (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2005). El frijol es un cultivo incluido en la dieta regional (Del Castillo, Fonseca, mantilla, & Medina et al., 2012), y existen registros documentados acerca de su efecto rizomejorador de la calidad del suelo (Mujica, 1994). Por tanto, es necesario

mantener los objetivos de fitomejoramiento en la obtención de variedades de alto valor nutricional y tolerantes al calor, pues con la predicción climática en cuanto al incremento de temperatura los cultivos de zona cálida y media deberán establecerse a mayor altura en la Sierra Nevada de Santa Marta, lo que afectaría las zonas de reserva forestal y el nacimiento de los ríos.

