

Análise da capacidade combinatória em feijoeiro comum submetido ao déficit hídrico

João Guilherme Ribeiro Gonçalves (1*); Alisson Fernando Chiorato (1); Daiana Alves da Silva (1); José Antonio de Fátima Esteves (1); Fátima Bosetti (2); Sérgio Augusto Morais Carbonell (1)

(1) Instituto Agronômico (IAC), Centro de Grãos e Fibras, Avenida Barão de Itapura, 1481, 13020-902 Campinas (SP), Brasil.

(2) Pioneer Hi-Bred International Inc., 405 Sul Alameda 32, Conjunto HM Lote 02, 77015-648 Palmas (TO), Brasil.

(*) Autor correspondente: jrggonalves@yahoo.com.br

Recebido: 1/out./2014; Aceito: 13/dez./2014

Resumo

O trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de genitores de feijoeiro para compor um programa de melhoramento visando à tolerância à seca. A capacidade geral e específica de combinação das cultivares foram avaliadas utilizando genitores identificados como tolerantes à seca (BAT 477 e SEA 5), genitores desenvolvidos pelo Instituto Agronômico – IAC (IAC Alvorada e IAC Carioca Tybatã) e suas progênies, oriundas de um dialelo completo, incluindo os recíprocos. A semeadura foi realizada em solo, usando delineamento de blocos casualizados com três repetições, tanto para o experimento com irrigação como para o experimento com déficit hídrico, aplicado a partir do pré-florescimento. As plantas submetidas ao déficit hídrico permaneceram nessa condição por um período de 30 dias. Foram avaliados caracteres fisiológicos, morfológicos, componentes de produção e produtividade de grãos, observando-se a presença de efeitos aditivos e não aditivos no controle das características, além de indicar que os genitores empregados no estudo contribuíram de forma diferenciada nos cruzamentos de que participaram. Considerando o déficit hídrico na pré-floração, os genitores SEA 5 e IAC Alvorada apresentaram efeitos positivos quanto à capacidade geral de combinação para os caracteres produtividade e massa de mil grãos, enquanto o genitor SEA 5 também destacou-se com efeito positivo em relação ao número de sementes por vagem, sugerindo o incremento para essas características nos cruzamentos dos quais participaram. O cruzamento SEA 5 × IAC Alvorada destacou-se para a característica produtividade de grãos por apresentar maior efeito positivo para capacidade específica de combinação e por ter como genitores as cultivares que apresentaram valores positivos para capacidade geral de combinação.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris*, feijão, melhoramento genético, dialelo, tolerância à seca.

Combining ability in common bean cultivars under drought stress

Abstract

This paper aimed at selecting parents to compose a common bean breeding program for drought tolerance. General and specific combining abilities were evaluated under controlled conditions, using drought tolerant parents (BAT 477 and SEA 5), elite cultivars developed at IAC (IAC Alvorada and IAC Carioca Tybatã) and their progenies obtained from a complete diallel, including the reciprocals. Sowing was done in soil following a randomized block design with three replications for both experiments, the control with irrigation and the drought stress experiment imposed from pre-flowering stage. Plants remained under drought stress for 30 days. Physiological and morphological traits as well as yield components and grain yield were evaluated, detecting additive and non-additive effects controlling these traits. The parents used in this study had contributed in different proportions in the crosses they participated in. Regarding the drought stress condition in the pre-flowering stage, the parents SEA 5 and IAC Alvorada presented greater positive effects for the general combining ability for the yield and weight of one thousand seeds, whereas the parent SEA 5 also showed a positive effect for the number of seeds per pod, suggesting the increase of these traits in the crosses they participated in. The hybrid combinations SEA 5 × IAC Alvorada showed a positive result for grain yield, related to the higher positive effect for specific combining ability and because they have as parents the cultivars which confer the best positive values for general combining ability.

Key words: *Phaseolus vulgaris*, common bean, plant breeding, diallel, drought tolerance.

1. INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma importante leguminosa utilizada para o consumo humano, considerada a principal fonte de proteína vegetal de consumo direto. O feijoeiro é amplamente cultivado sob condições de sequeiro na América Latina, sendo o déficit hídrico um dos principais

fatores limitantes para a sua produção, podendo reduzir de forma expressiva a produção de grãos em áreas cultivadas sem sistema de irrigação (Rosales et al., 2012).

Estima-se que as alterações climáticas nas próximas décadas serão drásticas, resultando na diminuição da disponibilidade

de água e no aumento da temperatura do ar nas principais áreas de produção agrícola do mundo. Nesse contexto, o crescimento constante da população, aliado às mudanças climáticas e à necessidade de produção de alimentos em larga escala, exigirá o cultivo de plantas mais adaptadas às condições de estresse (McClellan et al., 2011). Diante da intensificação dos estresses abióticos, vários grupos de pesquisa que atuam no melhoramento genético do feijoeiro têm implementado programas multidisciplinares para os estudos dos estresses abióticos, visando identificar genótipos tolerantes à seca, explorando sua variabilidade genética, como ciclo precoce, enraizamento profundo para maior absorção de água, adaptação fisiológica por meio da condutância estomática, aliados à satisfatória produtividade de grãos em cultivos sob estresse (Blair et al., 2012).

Singh et al. (2001) registraram a linhagem SEA 5 como cultivar tolerante à seca, derivada de cruzamento intrarracial entre as raças Mesoamericana e Durango, sendo a cultivar BAT 477 um dos parentais que deram origem à linhagem, também descrita pelos autores como tolerante à seca. Posteriormente, Terán & Singh (2002) também observaram superioridade produtiva do genótipo SEA 5, tanto em déficit hídrico como em condição irrigada, utilizando BAT 477 e San Cristobal 83 como testemunhas tolerantes. Estudando o sistema radicular por meio de uma triagem em sistema de tubos de solo para avaliar o impacto da seca em diferentes genótipos de feijão-comum, Rao et al. (2006) observaram que SEA 5 e BAT 477 mantiveram-se entre os genótipos que apresentaram raízes mais profundas.

Os mecanismos genéticos e fisiológicos inerentes às respostas das plantas ao déficit hídrico são importantes na seleção de materiais superiores para tolerância à seca. Outro fator importante é a escolha do momento da suspensão hídrica para a avaliação de genótipos de feijoeiro e, de acordo com Massignam et al. (1998), Stone & Silveira, (2012), Didonet & Silva (2004), a fase reprodutiva é indicada em virtude da redução ocasionada na produtividade dos genótipos.

Nos programas de melhoramento genético de plantas, a seleção de genótipos superiores para o desenvolvimento de novas cultivares é um dos principais objetivos, cuja eficiência é aumentada pela criteriosa avaliação dos genitores para composição dos cruzamentos (Machado et al., 2002). Dentre os métodos de análises genéticas, os estudos utilizando cruzamentos dialélicos possuem destacada participação (Oliveira et al., 1997). A análise dialélica fornece estimativas de parâmetros úteis na seleção de genitores para hibridação e no entendimento dos efeitos genéticos envolvidos na determinação dos caracteres. A metodologia de Griffing (1956) é comumente utilizada, pela qual são estimados os efeitos e as somas de quadrados dos efeitos da capacidade geral e específica de combinação (Cruz et al., 2004).

Tendo em vista a descrição prévia das cultivares SEA 5 e BAT 477, consideradas tolerantes ao déficit hídrico, e a eficiência produtiva e qualidade de grãos das cultivares elites IAC Alvorada e IAC Carioca Tybatá, este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento dessas quatro cultivares como genitores, em

esquema dialélico, para compor um programa de melhoramento visando a obtenção de linhagens tolerantes à seca.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizadas hibridações em esquema de dialélico completo, incluindo os recíprocos, entre quatro cultivares de feijoeiro, sendo duas cultivares tolerantes à seca (BAT 477 e SEA 5) e duas desenvolvidas pelo programa de melhoramento do feijoeiro do Instituto Agrônomo – IAC (IAC Alvorada e IAC Carioca Tybatá), selecionadas em função do potencial produtivo e qualidade de grãos.

As hibridações foram realizadas no período da manhã, entre 7 e 11h. Realizaram-se três sementeiras escalonadas entre os meses de maio e julho, para sincronizar o florescimento em função da variabilidade do ciclo apresentado pelas quatro cultivares. Posteriormente, foram obtidas as sementes F_2 por autofecundação natural da geração F_1 .

Os quatro genitores e as dez progênes F_2 obtidas, incluindo os recíprocos, foram avaliados na safra da “seca”, no ano agrícola de 2012, em condições protegidas e com sementeira diretamente no solo. Previu-se inicialmente a obtenção de doze progênes no esquema de dialélico completo envolvendo quatro genitores, no entanto, não foi possível obter as progênes oriundas das combinações SEA 5 × BAT 477 e IAC Alvorada × IAC Carioca Tybatá.

A irrigação foi realizada por sistema automatizado, com gotejadores espaçados a cada 0,15 m e com vazão de 0,90 L h⁻¹. Aplicaram-se duas irrigações diárias de seis minutos pela manhã no experimento irrigado e, no experimento com déficit hídrico, o fornecimento hídrico foi o mesmo até o momento da aplicação do déficit. Os tratos culturais foram realizados de acordo com as necessidades da cultura.

O delineamento foi de blocos casualizados com três repetições para os experimentos com e sem restrição hídrica. As parcelas experimentais foram constituídas por uma linha de dois metros de comprimento, com espaçamento de 0,5 m entrelinhas, com 13 plantas por metro. A restrição hídrica na condição estressada foi aplicada no mesmo dia para todos os genótipos em função da fase de pré-floração.

As plantas permaneceram com restrição hídrica por 30 dias. Este período foi estipulado em razão da elevada abscisão e senescência foliar, baixo potencial hídrico (Ψ_w) foliar (Boyer, 1976) e potencial matricial (Ψ_m) do solo, apresentando valores próximos à -199 kPa, a 0,40 m de profundidade, indicando escassez total de água. O Ψ_m do solo foi avaliado utilizando o medidor Watermark (30-KTCD-NL). Nesse período, quando as plantas apresentaram sintomas acentuados de estresse, foram realizadas as avaliações, por meio de medições em uma planta de cada parcela, quanto à massa seca da parte aérea, área foliar (Integrador de Área – LI-3100C), condutância estomática (Porômetro – Type AP4) e potencial hídrico foliar (câmara de pressão de Scholander – 3115) avaliado às 13h. Após o período de deficiência hídrica, a irrigação foi retomada até a maturação fisiológica.

Na maturidade fisiológica, avaliaram-se cinco plantas de cada parcela quanto ao número de vagens por planta (NVP), número de sementes por vagem (NSV), massa de mil grãos (MMG), altura de planta (AP) e produtividade de grãos (PG).

Para a realização da análise dialélica das condições irrigada e déficit hídrico, foi utilizado o modelo 1 de Griffing (1956), em que são avaliadas as combinações correspondentes aos parentais e seus cruzamentos, incluindo os recíprocos. Pela análise, estimaram-se a capacidade geral (CGC) e específica de combinação (CEC) e realizaram-se estimativas de valores perdidos para as duas combinações inexistentes.

As análises foram realizadas utilizando o programa GENES (Cruz, 2001), de acordo com o modelo estatístico (1):

$$Y_{ij} = m + g_i + g_j + s_{ij} + r_{ij} + \bar{\varepsilon}_{ij} \quad (1)$$

em que:

Y_{ij} : valor médio da combinação híbrida ($i \neq j$) ou do genitor ($i = j$);

m : média geral;

g_i, g_j : efeitos da capacidade geral de combinação do i -ésimo ou j -ésimo genitor ($i, j = 1, 2 \dots p$);

s_{ij} : efeito da capacidade específica de combinação para os cruzamentos entre os genitores de ordem i e j ;

r_{ij} : efeito recíproco que mede as diferenças proporcionadas pelo genitor i , ou j , quando utilizado como macho ou fêmea no cruzamento ij ;

$\bar{\varepsilon}_{ij}$: erro experimental médio associado à observação de ordem ij .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância revelou significância para genótipos com relação à maioria dos caracteres em condições de déficit hídrico, com exceção da AFT, MSPA e CE, evidenciando a existência de variabilidade entre os genitores e suas progênes em condição de déficit, favorecendo a seleção. Na condição irrigada, foram identificadas diferenças significativas entre os genótipos para os caracteres, MMG, NSV, AP, AFT, CE e Ψ_w (Tabela 1).

De modo geral, os coeficientes de variação (CV) apresentados na tabela 1 foram de magnitude baixa a mediana, indicando boa precisão na tomada dos dados dos experimentos, o que é desejável, uma vez que permite a obtenção de melhor resposta quanto à seleção. Observa-se também que o experimento com irrigação plena apresentou as maiores médias gerais para todas as características. A PG apresentou drástica redução em função da restrição hídrica e, segundo Silveira et al. (1981), esta variável decresce de acordo com o aumento no número de dias em condições de déficit hídrico. Os resultados obtidos eram esperados, uma vez que a cultura do feijoeiro é sensível à restrição hídrica, e a tendência é a redução das características aliada ao menor potencial hídrico foliar apresentado em virtude da condição de seca.

Foi possível verificar diferença do potencial hídrico foliar entre as duas condições hídricas, sendo a média geral dos genótipos, respectivamente, de $-0,58$ e $-0,94$ MPa, comprovando a eficiência do estresse. Diferenças de comportamento foram

Tabela 1. Resumo da análise de variância para a capacidade combinatória referente à produtividade (PG), massa de mil grãos (MMG), número de vagens por planta (NVP), número de sementes por vagem (NSV), altura de planta (AP), área foliar total (AFT), massa seca da parte aérea (MSPA), condutância estomática (CE) e potencial hídrico foliar (Ψ_w) avaliado às 13h de genótipos de feijoeiro sob condições irrigadas e de déficit hídrico

| Quadrado médio - Déficit hídrico | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----|---|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|--|---------------------|
| FV | GL | PG (kg ha ⁻¹) ¹ | MMG (g) | NVP ¹ | NSV | AP (cm) | AFT (cm ²) ¹ | MSPA (g) ¹ | CE (mmol m ⁻² s ⁻¹) ¹ | Ψ_w (MPa) |
| Genótipo | 15 | 1068,64** | 607,21* | 7,73* | 0,98** | 2008,07** | 673793,74 ^{ns} | 47,23 ^{ns} | 2170,72 ^{ns} | 0,038* |
| CGC | 3 | 1309,75** | 2088,94** | 3,60 ^{ns} | 3,86** | 7618,34** | 434720,83 ^{ns} | 49,95 ^{ns} | 396,38 ^{ns} | 0,037 ^{ns} |
| CEC | 6 | 1433,16** | 256,89 ^{ns} | 10,23* | 0,29 ^{ns} | 321,94 ^{ns} | 493137,22 ^{ns} | 62,30* | 3598,04* | 0,036 ^{ns} |
| Efeito Recíproco | 6 | 583,57* | 216,66 ^{ns} | 7,28 ^{ns} | 0,22 ^{ns} | 889,07 ^{ns} | 973986,73 ^{ns} | 30,79 ^{ns} | 1630,56 ^{ns} | 0,04 ^{ns} |
| Resíduo | 30 | 235,80 | 235,00 | 3,14 | 0,19 | 415,16 | 425258,74 | 25,07 | 1316,13 | 0,015 |
| Média | | 802,3 | 229,40 | 6,94 | 3,86 | 147,72 | 1100,57 | 12,86 | 68,48 | -0,94 |
| CV (%) | | 9,89 | 7,13 | 11,77 | 12,17 | 14,61 | 37,55 | 19,63 | 12,75 | 14,06 |
| Quadrado médio - Irrigado | | | | | | | | | | |
| FV | GL | PG (kg ha ⁻¹) ¹ | MMG (g) | NVP ¹ | NSV | AP (cm) | AFT (cm ²) ¹ | MSPA (g) ¹ | CE (mmol m ⁻² s ⁻¹) ¹ | Ψ_w (MPa) |
| Genótipo | 15 | 3608,87 ^{ns} | 8170,16** | 10,74 ^{ns} | 0,41* | 2200,26* | 1956184,27* | 121,99 ^{ns} | 858,44** | 0,042** |
| CGC | 3 | 2102,29 ^{ns} | 20076,41** | 5,70 ^{ns} | 1,00** | 6428,97** | 4104478,77** | 167,51 ^{ns} | 818,19 ^{ns} | 0,048* |
| CEC | 6 | 5414,24 ^{ns} | 2722,25 ^{ns} | 19,23 ^{ns} | 0,34 ^{ns} | 1411,62 ^{ns} | 957653,17 ^{ns} | 112,68 ^{ns} | 833,79* | 0,023 ^{ns} |
| Efeito Recíproco | 6 | 2556,80 ^{ns} | 7664,94** | 4,77 ^{ns} | 0,17 ^{ns} | 874,54 ^{ns} | 1880568,13 ^{ns} | 108,55 ^{ns} | 903,22* | 0,577** |
| Resíduo | 30 | 2731,20 | 1673,76 | 9,49 | 0,17 | 859,09 | 828625,97 | 62,72 | 283,15 | 0,012 |
| Média | | 1704,9 | 266,62 | 11,02 | 4,79 | 149,45 | 2204,74 | 19,22 | 129,80 | -0,58 |
| CV (%) | | 15,27 | 7,91 | 13,15 | 9,18 | 20,61 | 21,87 | 21,90 | 14,66 | 20,01 |

¹Dados transformados ($\sqrt{x+1}$). *Significativo a 5% de probabilidade. **Significativo a 1% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

verificadas somente sob déficit hídrico, em que o Ψ_w foliar variou entre $-0,73$ e $-1,20$ MPa. Guimarães et al. (2006) encontraram, para duas cultivares de feijoeiro submetidas a restrição hídrica no período reprodutivo, valores mínimos de $-0,97$ e $-1,07$ MPa para Ψ_w foliar avaliado no período de máxima intensidade de radiação solar.

Essa diferença apresentada no potencial hídrico entre as duas condições hídricas refletiu em uma redução de 53% na PG, e na figura 1, observa-se que o genótipo 10 (IAC Alvorada \times BAT 477) foi o que apresentou a maior média de produtividade sob condição irrigada, e os genótipos 9 (SEA 5 \times IAC Alvorada) e 12 (IAC Carioca Tybatá \times IAC Alvorada), revelaram as maiores PG sob condições de déficit hídrico. Os genótipos 7 (BAT 477 \times IAC Alvorada), 11 (IAC Alvorada \times SEA 5) e 14 (IAC Carioca Tybatá \times SEA 5) destacaram-se com relação à PG, considerando ambas as condições hídricas, no entanto, os dois primeiros com destaque para condição irrigada e o último para condição de restrição hídrica.

O desdobramento da análise de variância dialélica com relação à restrição hídrica (Tabela 1) mostrou a existência de diferenças significativas entre os genitores para capacidade geral de combinação (CGC) para as características PG, MMG, NSV e AP. Foram também verificados efeitos significativos para CGC na condição irrigada para as seguintes características: MMG, NSV, AP, AFT e Ψ_w . Considerando a capacidade específica de combinação (CEC) sob déficit hídrico, houve efeito significativo para as características PG, NVP, MSPA e CE. Sob irrigação, houve efeito significativo para CEC apenas para a característica CE. Estas significâncias evidenciam a presença de efeitos aditivos e não aditivos no controle das características avaliadas, além de indicar que os quatro genitores utilizados no estudo contribuíram diferentemente nos cruzamentos em que participaram, devido à variabilidade apresentada.

Houve significância para efeito recíproco para PG sob déficit hídrico. Com relação à condição irrigada, observou-se efeito recíproco para MMG, CE e Ψ_w . Nesse sentido, de acordo com Ramalho et al. (2000), deve-se considerar o comportamento do genitor, podendo ser utilizado ora como “fêmea” (receptor de pólen), ora como “macho” (doador de pólen). Baldissera et al. (2012), avaliando os cruzamentos oriundos de seis genitores de feijoeiro sem indução de déficit hídrico, encontraram efeito recíproco significativo para ciclo, altura de planta, altura de inserção da primeira vagem, diâmetro do caule e número de vagens por planta. Dessa forma, os autores concluem que há diferença quando um genótipo é utilizado como doador ou receptor de pólen, pois existe a presença de efeito citoplasmático e de genes nucleares do genitor feminino nos caracteres avaliados.

Pôde-se constatar, em ambos os experimentos, a predominância de efeitos de aditividade na herança do caráter para as características MMG, NSV e AP, devido à significância apresentada somente pelo CGC. Os efeitos gênicos aditivos são fixados ao longo de sucessivas gerações, sendo, sobretudo, importantes para espécies autógamas (Carvalho & Ribeiro, 2002).

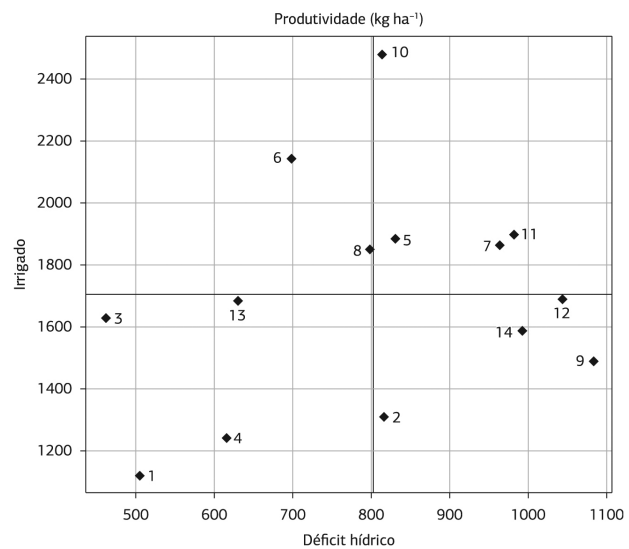


Figura 1. Performance de dez progênies e dos quatro respectivos genitores de feijoeiro, considerando as duas condições hídricas: 1- Déficit hídrico no estádio de pré-florescimento (eixo das abscissas) e; 2 - Irrigado (eixo das ordenadas). Genótipos: 1- BAT 477; 2- SEA 5; 3 - IAC Alvorada; 4 - IAC Carioca Tybatá; 5 - BAT 477 \times SEA 5; 6 - BAT 477 \times IAC Carioca Tybatá; 7 - BAT 477 \times IAC Alvorada; 8 - SEA 5 \times IAC Carioca Tybatá; 9 - SEA 5 \times IAC Alvorada; 10 - IAC Alvorada \times BAT 477; 11 - IAC Alvorada \times SEA 5; 12 - IAC Carioca Tybatá \times IAC Alvorada; 13 - IAC Carioca Tybatá \times BAT 477 e 14 - IAC Carioca Tybatá \times SEA 5.

Houve predominância de efeitos de dominância sob déficit hídrico para as características NVP, MSPA e CE, enquanto na condição irrigada verificou-se predominância de efeito de dominância somente para CE, devido à significância de CEC. A característica PG no déficit hídrico demonstrou ter herança mais complexa, apresentando efeitos de aditividade e dominância, ou seja, significância tanto para CGC como para CEC.

Considerando as estimativas dos efeitos da capacidade geral de combinação \hat{g}_i na condição de déficit hídrico (Tabela 2), as cultivares SEA 5 e IAC Alvorada apresentaram resultados positivos para PG e MMG, evidenciando incrementos de 93,7 e 18,3 kg ha⁻¹ na PG e de 10,69 e 4,93 g na MMG, respectivamente, nos cruzamentos em que participaram para esse grupo de genótipos. Este é um importante resultado, pois os programas de melhoramento genético do feijoeiro têm priorizado a qualidade de grãos, além da alta produtividade e resistência a pragas e doenças, com o intuito de atender ao mercado consumidor, que vem optando por grãos maiores e com elevada massa de mil grãos (Carbonell et al., 2010). A cultivar SEA 5 também apresentou efeito positivo para NSV em condições de déficit hídrico, o que torna estas cultivares promissoras para seleção em condições de seca. Quando se considera o experimento com irrigação plena, a cultivar IAC Alvorada continua se destacando com alto valor para CGC para PG e MMG.

Tabela 2. Estimativas dos efeitos de capacidade geral de combinação (\hat{g}_i) avaliada em quatro cultivares de feijoeiro submetidas ao déficit hídrico e sob irrigação plena para produtividade de grãos (PG), massa de mil grãos (MMG), número de sementes por vagem (NSV) e altura de planta (AP)

| Cultivares | PG | MMG (g) | NSV | AP (cm) |
|------------------------|------------------------|---------|---------|---------|
| | (kg ha ⁻¹) | | | |
| Déficit Hídrico | | | | |
| 1- BAT 477 | -78,1 | -8,26 | -0,263 | 20,06 |
| 2- SEA 5 | 93,7 | 10,69 | 0,588 | -22,55 |
| 3- IAC Alvorada | 18,3 | 4,93 | -0,075 | -3,12 |
| 4- IAC Carioca Tybatã | -33,9 | -7,37 | -0,25 | 5,61 |
| Irrigado | | | | |
| Cultivares | PG | MMG (g) | NSV | AP (cm) |
| | (kg ha ⁻¹) | | | |
| 1- BAT 477 | 18,1 | -31,74 | 0,19 | 10,63 |
| 2- SEA 5 | -102,5 | -4,86 | -0,0063 | -20,06 |
| 3- IAC Alvorada | 119,3 | 38,41 | -0,281 | -6,33 |
| 4- IAC Carioca Tybatã | -34,9 | -1,81 | 0,094 | 15,76 |

De acordo com Cruz et al. (2004), as estimativas da CGC proporcionam informações sobre a concentração de genes predominantemente aditivos em seus efeitos, sendo de grande utilidade na identificação de genitores a serem empregados nos programas de melhoramento. Desse modo, quanto maior a estimativa da CGC, maior será a frequência de alelos favoráveis e assim, maior será o incremento nas características selecionadas com determinado comportamento (Krause et al., 2012).

Pôde-se também observar que os genitores com maiores valores de CGC para PG contribuíram para redução da AP, devido aos valores negativos de CGC apresentados por essa característica sob deficiência hídrica. Além disso, sob irrigação plena, SEA 5 e IAC Alvorada também demonstraram efeitos negativos de \hat{g}_i para AP. Moraes et al. (2010) também indicaram redução na altura de plantas de feijão em cultivo sob déficit hídrico. Molina et al. (2001) observaram uma correlação negativa entre produtividade de grãos e altura de planta em cultivares de feijoeiro de tegumento preto.

As cultivares BAT 477 e IAC Carioca Tybatã revelaram efeitos negativos de \hat{g}_i para PG e MMG sob déficit hídrico, sugerindo a redução dessas características. Essas mesmas cultivares apresentaram efeitos positivos de \hat{g}_i para AP para as duas condições hídricas, sugerindo o aumento da característica. Krause et al. (2012) também encontraram efeito positivo de \hat{g}_i para altura de planta para IAC Carioca Tybatã em condições de campo. Gonçalves-Vidigal et al. (2008) observaram a ocorrência de efeitos aditivos e não aditivos em condições irrigadas para a altura de planta, número de vagens por planta, número de sementes por planta, número de sementes por vagem, peso médio de 50 sementes e produtividade de grãos, além de obterem resultados semelhantes para a cultivar IAC Carioca Tybatã, que apresentou efeitos negativos de \hat{g}_i para

produtividade e massa de grãos e efeitos positivos de \hat{g}_i para altura de planta.

Para obter sucesso em qualquer programa de melhoramento, é necessário que os objetivos da pesquisa sejam claros e bem definidos e, por meio dos efeitos de \hat{g}_i , pode-se realizar a seleção com maior garantia de sucesso, uma vez que a produtividade é uma das características mais importantes para avaliação das culturas, principalmente, quando se trata de seleção de genótipos em condições adversas de ambiente, mas que apresentem produtividade satisfatória. Diante disso, observou-se que a cultivar SEA 5 apresentou efeitos positivos de \hat{g}_i para PG, MMG e NSV e, a cultivar IAC Alvorada, revelou efeito positivo de \hat{g}_i para PG e MMG, podendo ser essas duas cultivares indicadas para compor blocos de cruzamento que visem o aumento dessas características em condições de restrição hídrica (Tabela 2).

As estimativas dos efeitos da capacidade específica de combinação (\hat{s}_{ij}) apresentadas na tabela 3 auxiliam na seleção das melhores combinações. A seleção deve priorizar as estimativas de \hat{s}_{ij} mais favoráveis e que envolvam pelo menos um dos genitores que tenha demonstrado efeito favorável da CGC (Cruz et al., 2004). Para a característica PG considerando o experimento sob déficit hídrico, as combinações que revelaram efeitos positivos para \hat{s}_{ij} foram: 1×3 (BAT 477 × IAC Alvorada), 3×1 (IAC Alvorada × BAT 477), 4×1 (IAC Carioca Tybatã × BAT 477), 2×3 (SEA 5 × IAC Alvorada), 3×2 (IAC Alvorada × SEA 5) e 2×4 (SEA 5 × IAC Carioca Tybatã), sendo que quase todos os cruzamentos possuem participação dos genitores SEA 5 e IAC Alvorada, que apresentaram os maiores valores para CGC. Estes resultados indicam que essas combinações específicas contribuíram para o aumento da PG. As combinações 1×2 (BAT 477 × SEA 5), 1×4 (BAT 477 × IAC Carioca Tybatã), 4×2 (IAC Carioca Tybatã × SEA 5) e 4×3 (IAC Carioca Tybatã × IAC Alvorada) demonstraram efeitos negativos de \hat{s}_{ij} e, com isso, tendem a reduzir a característica.

As melhores combinações para PG, na condição de déficit hídrico, envolveram a cultivar IAC Alvorada, ora como pai no cruzamento com SEA 5 (cruzamento 2×3), ora como mãe na combinação com BAT 477 (cruzamento 3×1), conforme a tabela 3. A alta produtividade demonstrada por SEA 5 × IAC Alvorada sob condições de déficit hídrico deve-se à alta estimativa de CGC apresentada pelas duas cultivares, ou seja, elevada concentração de alelos favoráveis que proporcionou o desenvolvimento da combinação híbrida portadora de elevada média para a característica.

Com relação ao NVP, as combinações que revelaram efeitos positivos de \hat{s}_{ij} sob restrição hídrica foram: 1×2 (BAT 477 × SEA 5), 1×3 (BAT 477 × IAC Alvorada), 4×1 (IAC Carioca Tybatã × BAT 477) e 2×3 (SEA 5 × IAC Alvorada). Essas combinações mostram-se promissoras quanto à tolerância à seca, pois, apresentando efeitos positivos para o NVP, em condições de seca, tendem a diminuir a redução da PG. O NVP é um componente de produção severamente afetado pelo déficit hídrico (Nuñez Barrios et al., 2005; Sousa & Lima, 2010).

Tabela 3. Estimativas dos efeitos da capacidade específica de combinação (\hat{s}_{ij}) resultantes dos cruzamentos dialélicos entre quatro cultivares de feijoeiro submetido ao déficit hídrico e sob irrigação plena com relação à produtividade de grãos (PG), número de vagens por planta (NVP), massa seca da parte aérea (MSPA) e condutância estomática (CE)

| Combinações | | Déficit Hídrico | | | | | | | |
|----------------------|--------|-----------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--|
| | | PG | | NVP | | MSPA | | CE | |
| Genitores: (A) × (B) | (A×B) | (B×A) | (A×B) | (B×A) | (A×B) | (B×A) | (A×B) | (B×A) | |
| 1 × 2 | -16,80 | - | 0,67 | - | 3,10 | - | 3,68 | - | |
| 1 × 3 | 15,84 | 75,00 | 1,62 | -0,15 | -0,88 | -1,17 | 38,11 | -34,50 | |
| 1 × 4 | -13,50 | 34,00 | -0,52 | 1,20 | -0,94 | -2,75 | -20,02 | -2,34 | |
| 2 × 3 | 131,00 | 50,50 | 0,81 | -0,35 | 0,61 | 1,59 | -33,60 | 2,50 | |
| 2 × 4 | 45,70 | -97,00 | -0,48 | -1,25 | 4,01 | -0,39 | 13,11 | 4,17 | |
| 3 × 4 | - | -194,6 | - | -0,55 | - | -0,008 | - | 17,15 | |
| Combinações | | Irrigado | | | | | | | |
| | | PG | | NVP | | MSPA | | CE | |
| Genitores: (A) × (B) | (A×B) | (B×A) | (A×B) | (B×A) | (A×B) | (B×A) | (A×B) | (B×A) | |
| 1 × 2 | 110,00 | - | -0,19 | - | 4,78 | - | 7,60 | - | |
| 1 × 3 | 315,20 | -307,50 | 1,99 | 1,20 | -0,28 | -3,92 | -14,14 | -5,08 | |
| 1 × 4 | 212,80 | 229,00 | 2,18 | 1,00 | 3,76 | -8,75 | 6,60 | -18,83 | |
| 2 × 3 | -44,20 | -202,50 | -0,07 | -0,85 | 3,63 | -1,00 | -7,24 | 0,67 | |
| 2 × 4 | 137,00 | 132,50 | -0,53 | 0,10 | -1,99 | 0,34 | 1,41 | -18,33 | |
| 3 × 4 | - | 176,70 | - | 1,05 | - | 1,04 | - | 2,98 | |

Genitores: 1-BAT 477, 2-SEA 5, 3-IAC Alvorada e 4-IAC Carioca Tybatá.

Os efeitos de \hat{s}_{ij} para massa seca (Tabela 3) permite observar que as combinações 1×2 (BAT 477 × SEA 5), 2×3 (SEA 5 × IAC Alvorada), 3×2 (IAC Alvorada × SEA 5) e 2×4 (SEA 5 × IAC Carioca Tybatá) apresentaram valores positivos para CGC sob déficit hídrico. Houve um decréscimo de 33% na massa seca das plantas submetidas ao déficit hídrico, estando de acordo com os resultados revelados por Gomes et al. (2000), que observaram redução da massa seca de folhas, caule e vagens, bem como na área foliar das plantas conduzidas sob condições de déficit hídrico.

Considerando a condutância estomática (CE) avaliada entre 9h e 11h na face abaxial da folha, em feijoeiro submetido ao déficit hídrico na fase de pré-floração (Tabela 3), pode-se observar que as combinações 1×2 (BAT 477 × SEA 5), 1×3 (BAT 477 × IAC Alvorada), 3×2 (IAC Alvorada × SEA 5), 2×4 (SEA 5 × IAC Carioca Tybatá), 4×2 (IAC Carioca Tybatá × SEA 5) e 4×3 (IAC Carioca Tybatá × IAC Alvorada) apresentaram efeito positivo de \hat{s}_{ij} e, com isso, maior abertura estomática e, conseqüentemente, maior perda de água para a atmosfera pela transpiração, ocorrendo no entanto uma maior assimilação de CO₂. As demais combinações apresentaram valores negativos de \hat{s}_{ij} para CE, sugerindo o parcial fechamento estomático que, segundo Taiz & Zeiger (2009), é a maneira pela qual as plantas podem se adaptar fisiologicamente às condições de seca. Pimentel et al. (1999) comentam sobre a existência de diferenças genotípicas para a característica com relação ao feijoeiro submetido às condições de deficiência hídrica. Para condições irrigadas, revelaram efeitos negativos de \hat{s}_{ij} somente as combinações 1×3 (BAT 477 × IAC Alvorada), 3×1 (IAC Alvorada × BAT 477), 4×1 (IAC Carioca Tybatá × BAT 477), 2×3 (SEA 5 × IAC Alvorada) e 4×2 (IAC Carioca Tybatá × SEA 5), sugerindo menor abertura estomática.

4. CONCLUSÃO

Houve para ambas as condições hídricas a presença de efeitos aditivos e não aditivos no controle das características avaliadas, indicando que os quatro genitores utilizados no estudo contribuíram diferentemente nos cruzamentos dos quais participaram.

Os genitores SEA 5 e IAC Alvorada são indicados para compor programas de melhoramento para tolerância à seca em virtude de sua capacidade geral de combinação, considerando a produtividade de grãos.

O cruzamento SEA 5 × IAC Alvorada, em condição de déficit hídrico, destacou-se para produtividade de grãos, considerando a capacidade específica de combinação.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pela concessão da bolsa de estudo (Processo FAPESP 2008/11056-9) e subsídios do projeto regular para a compra dos equipamentos (Processo FAPESP 2010/07898-4), e à Dr.^a Maria Elisa A. G. Zagatto Paterniani, pelo apoio às análises estatísticas.

REFERÊNCIAS

Baldissera, J. N. C., Valentini, G., Coan, M. M. D., Almeida, C. B., Guidolin, A. F., & Coimbra, J. L. M. (2012). Capacidade combinatória e efeito recíproco em características agrônômicas do feijão. *Semina: Ciências Agrárias*, 33, 471-480. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n2p471>

- Blair, M. W., Galeano, C. H., Tovar, E., Muñoz Torres, M. C., Castrillón, A. V., Beebe, S. E., & Rao, I. M. (2012). Development of a Mesoamerican intra-geneepool genetic map for quantitative trait loci detection in a drought tolerant × susceptible common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cross. *Molecular breeding: new strategies in plant improvement*, 29, 71-88. <http://dx.doi.org/10.1007/s11032-010-9527-9>. PMID:22267950
- Boyer, J. S. (1976). Water deficits and photosynthesis. In T. T. Kozlowski (Ed.), *Water deficits and plant growth* (Vol. 4, p. 153-190). New York: Academic.
- Carbonell, S. A. M., Chiorato, A. F., Gonçalves, J. G. R., Perina, E. F., & Carvalho, C. R. L. (2010). Tamanho de grão comercial em cultivares de feijoeiro. *Ciência Rural*, 40, 2067-2073. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782010005000159>.
- Carvalho, A. C. P. P., & Ribeiro, R. L. D. (2002). Análise da capacidade combinatória em cruzamentos dialélicos de três cultivares de jiloeiro. *Horticultura Brasileira*, 20, 48-51. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362002000100009>.
- Cruz, C. D. (2001). Programa Genes: aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 394 p.
- Cruz, C. D.; Regazzi, A. D.; & Carneiro, P. C. S. (2004). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 480 p.
- Didonet, A. D., & Silva, S. C. (2004). Feijão de alta produtividade: elementos climáticos e produtividade do feijoeiro. *Belo Horizonte. Informe Agropecuário*, 25, 13-19.
- Gomes, A. A., Araújo, A. P., Rossielo, R. O. P., & Pimentel, C. (2000). Acumulação de biomassa, características fisiológicas e rendimento de grãos em cultivares de feijoeiro irrigado e sob sequeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35, 1927-1937. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2000001000003>.
- Gonçalves-Vidigal, M. C., Silvério, L., Elias, H. T., Vidigal, P. S., Fo., Kvitschal, M. V., Retuci, V. S., & Silva, C. R. (2008). Combining ability and heterosis in common bean cultivars. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 1143-1150. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008000900007>.
- Guimarães, C. M., Stone, L. F., & Brunini, O. (2006). Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10, 70-75. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000100011>.
- Krause, W., Rodrigues, R., & Leal, N. R. (2012). Capacidade combinatória para características agronômicas em feijão de vagem. *Revista Ciência Agronômica*, 43, 522-531. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902012000300015>.
- Machado, C. F., Santos, J. B., Nunes, G. H. S., & Ramalho, M. A. P. (2002). Choice of common bean parents based on combining ability estimates. *Genetics and Molecular Biology*, 25, 179-183. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-47572002000200011>.
- Massignam, A. M., Vieira, H. J., Hemp, S., Dittrich, R. C., Flech, R. D., & Victoria, F. B. (1998). Ecofisiologia do Feijoeiro. I – Determinação do período mais crítico à deficiência hídrica no solo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6, 35-39.
- McClellan, P. E., Burrridge, J., Beebe, S., Rao, I. M., & Porch, T. G. (2011). Crop improvement in the era of climate change: an integrated, multi-disciplinary approach for common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Functional Plant Biology*, 38, 927-933. <http://dx.doi.org/10.1071/FP11102>.
- Molina, J. C., Moda-Cirino, V., Fonseca, N. S., Jr., Faria, R. T., & Destro, D. (2001). Response of common bean cultivars and lines to water stress. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 1, 363-372. <http://dx.doi.org/10.13082/1984-7033.v01n04a05>.
- Moraes, W. B., Martins, S., Fo., Garcia, G. O., Caetano, S. P., & Moraes, W. B. (2010). Seleção de genótipos de feijoeiro à seca. *IDESIA*, 28, 53-59. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292010000200006>.
- Núñez Barrios, A., Hoogenboom, G., & Nesmith, D. S. (2005). Drought stress and the distribution of vegetative and reproductive traits of a bean cultivar. *Scientia Agricola*, 62, 18-22. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162005000100004>.
- Oliveira, A., Jr., Miranda, G. V., & Cruz, C. D. (1997). Capacidade combinatória de cultivares de feijão avaliada em sistemas dialélicos desbalanceados de meia tabela e circulante. *Revista Ceres*, 44, 215-229.
- Pimentel, C., Hébert, G., & Silva, J. V. (1999). Effectes of drought on O₂ evolution and stomatal conductance of beans at the pollination stage. *Environmental and Experimental Botany*, 42, 155-162. [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-8472\(99\)00030-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-8472(99)00030-1).
- Ramalho, M. A. P., Santos, J. B., & Pinto, C. A. B. P. (2000). Genética na Agropecuária. Lavras: UFLA. 472 p.
- Rao, I. M., Polania, J., Garcia, R., & Beebe, S. (2006). Development of a greenhouse soil tube method to quantify phenotypic differences among advanced lines in root development and distribution under drought stress. In *Centro Internacional de Agricultura Tropical (Ed.), Annual Report. Project IP-1: Bean improvement for the tropics* (p. 19-25). Cali, Colombia: CIAT.
- Rosales, M. A., Ocampo, E., Rodríguez-Valentín, R., Olvera-Carrillo, Y., Acosta-Gallegos, J., & Covarrubias, A. A. (2012). Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. *Plant physiology and biochemistry: PPB / Société française de physiologie végétale*, 56, 24-34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.007>. PMID:22579941
- Silveira, P. M., Guimarães, C. M., Stone, L. F., & Kluthcouski, J. (1981). Avaliação de cultivares de feijão para resistência à seca, baseada em dias de estresse de água no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 16, 693-699.
- Singh, S. P., Terán, H., & Gutierrez, J. A. (2001). Registration of SEA 5 and SEA 13 drought tolerant dry bean germplasm. *Crop Science*, 41, 276-277. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2001.411276x>.
- Sousa, M. A., & Lima, M. D. B. (2010). Influência da supressão da irrigação em estádios de desenvolvimento do feijoeiro cv. carioca comum. *Bioscience Journal*, 26, 550-557.
- Stone, L. F., & Silveira, P. M. (2012). Manejo de irrigação do feijoeiro. *Comunicado Técnico*, 38, 1-4 Recuperado em 06 de junho de 2012, de http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/comt_38ID-nFSIHUt28m.pdf
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2009). *Fisiologia vegetal* (4 ed.). Porto Alegre: Artmed. 848 p.
- Terán, H., & Singh, S. P. (2002). Comparison of sources and lines selected for drought resistance in common bean. *Crop Science*, 42, 64-70. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2002.0064>. PMID:11756255