

Relações lineares entre caracteres radiculares e de parte aérea em gerações segregantes de feijão comum

Linear relationships between root and above-ground traits in common bean segregant generations

Paulo Henrique Cerutti* (ORCID 0000-0001-6664-8449), **Luan Tiago dos Santos Carbonari** (ORCID 0000-0002-7797-5194), **Carlos Zacarias Joaquim Júnior** (ORCID 0000-0001-8681-9946), **Altamir Frederico Guidolin** (ORCID 0000-0003-3028-0958), **Jefferson Luís Meirelles Coimbra** (ORCID 0000-0001-9492-6055)

Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, Brasil. Autor para correspondência: paulohcerutti@gmail.com

Submissão: 14/07/2023 | Aceite: 22/08/2023

RESUMO

A estimativa de correlação e sua partição em causa e efeito é vista como uma ferramenta valiosa na obtenção de ganhos com a seleção no melhoramento de plantas. Isso permite a antecipação da escolha dos melhores genótipos. Deste modo, o objetivo do trabalho foi considerar a seleção indireta para melhoria simultânea de características radiculares e de parte aérea em populações segregantes de feijão. O experimento foi executado na safra 2021/22, considerando seis genótipos de feijão, sendo dois genitores e quatro gerações segregantes (F_2 , F_3 , F_4 e F_5), sob delineamento látice. Foram mensuradas variáveis do sistema radicular por dois métodos de fenotipagem, denominados de Shovelomics e WinRHIZO. As variáveis avaliadas de parte aérea foram os teores de clorofila, estatura de plantas, diâmetro de caule, altura de inserção do primeiro legume e componentes do rendimento (número de legumes, número de grãos e peso de grãos por planta). Foram executadas as análises de correlação e análise de causa e efeito (trilha). Foram evidenciadas estimativas de correlação (τ) significativas entre características radiculares e de parte aérea, com destaque para o teor de clorofila B com comprimento horizontal esquerdo ($\tau = -0,22$) e teor de clorofila A com comprimento total de raízes ($\tau = 0,24$). O desdobramento destas estimativas pela análise de trilha indicou que o teor de clorofila A tem correlação e elevado efeito direto sobre o comprimento total de raízes e que o teor de clorofila total influencia indiretamente os comprimentos radiculares horizontais esquerdo e direito. Este fato possibilita a obtenção de ganhos coma a seleção de plantas de feijão melhoradas para sistema radicular com base na avaliação direta e indireta dos teores de clorofila, facilmente mensurados na parte aérea das plantas. Isso permite a otimização de tempo e recursos nos programas de melhoramento, visando a obtenção de plantas agronomicamente superiores.

PALAVRAS-CHAVE: análise de trilha; correlação; ganhos com a seleção; melhoramento de plantas.

ABSTRACT

The correlation estimation and its partition into cause and effect is seen as a valuable tool in obtaining gains from selection in plant breeding. This allows the anticipation of choosing the best genotypes. Thus, the objective of this study was to consider indirect selection for simultaneous improvement of root and above-ground traits in segregating common bean populations. The experiment was carried out in the 2021/22 season, considering six common bean genotypes, two parents and four segregating generations (F_2 , F_3 , F_4 and F_5), under a lattice design. Root system traits were measured by two phenotyping methods, called Shovelomics and WinRHIZO. The aerial part traits evaluated were chlorophyll content, plant height, stem diameter, first pod height insertion and yield components (number of pods, number of grains and weight of grains per plant). Correlation analysis and cause and effect analysis (path analysis) were performed. Significant correlation estimates (τ) were found between root and aerial traits, with emphasis on chlorophyll B content with left horizontal length ($\tau = -0.22$) and chlorophyll A content with total root length ($\tau = 0.24$). The unfolding of these estimates by path analysis indicated that the chlorophyll A content has a correlation and a high direct effect on the total length of roots and that the total chlorophyll content indirectly influences the left and right horizontal root lengths. This fact makes it possible to obtain gains with the selection of improved common bean plants for root system based on the direct and indirect evaluation of chlorophyll contents, easily measured in the aerial part of the plants. This allows the optimization of time and resources in breeding programs, aiming at obtaining agronomically superior plants.

KEYWORDS: path analysis; correlation; selection gains; plant breeding.

INTRODUÇÃO

O cultivo de feijão (*Phaseolus vulgaris* L., $2n = 2x = 22$), apresenta relevância principalmente em países em desenvolvimento. A principal razão associada ao seu consumo se deve a quantidade e qualidade de proteína e elementos minerais presentes nos grãos (BULYABA et al. 2020). Além deste apelo comestível, esta leguminosa também é importante em sistemas produtivos, já que participa ativamente da rotação de culturas em áreas agrícolas, contribuindo para melhoria das condições de solo e econômicas dos produtores rurais (BISATO et al. 2021).

Com base na relevância da cultura do feijão, os programas de melhoramento genético ao longo dos anos têm direcionado os seus esforços no desenvolvimento de cultivares aprimoradas para rendimento de grãos e componentes associados (KARAVIDAS et al. 2022). Desta forma, a seleção de plantas superiores foi fundamentada no ideótipo de feijão voltado a maior produtividade de grãos, plantas com ciclo intermediário (85 – 100 dias), maior estatura, maior altura de inserção do primeiro legume, maior diâmetro de caule e tolerância a doenças (DA ROCHA et al. 2014, ROCHA et al. 2019).

O desenvolvimento de genótipos mais produtivos que contemplaram estas características potencializou a produção agrícola e o aumento de renda na cadeia produtiva da cultura. Porém, no decorrer deste processo, também foi observado uma redução da produtividade dos genótipos quando submetidos ao cultivo em ambientes com condições limitantes, em especial água e elementos minerais. Estas condições suprimem o crescimento e desenvolvimento das plantas e conseqüentemente fazem com que o potencial genético para a produção de grãos não seja atingido (STROCK et al. 2019). Na tentativa de reduzir ou evitar os problemas voltados ao cultivo em ambientes desfavoráveis, melhoristas de plantas têm voltado sua atenção para a identificação de características radiculares que potencializem o desenvolvimento de cultivares mais eficientes na aquisição de recursos hídricos e minerais do meio de cultivo (SCHNEIDER et al. 2020).

Deste modo, o cenário atual de produção agrícola conduz os programas de melhoramento a reconsiderar o ideótipo para a cultura, combinando tanto características de parte aérea quanto radiculares. A fenotipagem (ato de avaliar o fenótipo das plantas) em caracteres acima do solo é facilitada, comparativamente a características ocultas (sistema radicular), além de que quantificar variáveis radiculares é um processo demorado e dificultoso, demandando tempo e mão-de-obra abundante e qualificada (MARSHALL et al. 2016). Com base nisso, surge a importância de considerar a melhoria simultânea de mais de uma característica agrônômica de interesse. Esta melhoria conjunta de características pode ser possível por meio de estimativas de associação entre caracteres. Isso permite diagnosticar a alteração de uma característica quando se modifica outra, promovendo ganhos facilitados com a seleção (BARILI et al. 2011).

Somado a estimativa de associação entre características de interesse, a partição desta associação em efeitos diretos e indiretos é importante pelo fato de possibilitar a predição do valor de uma característica a partir do conhecimento de outra. Isto permite ao melhorista de plantas a seleção indireta de características difíceis de serem fenotipadas, como por exemplo o sistema radicular (CRUZ et al. 2012). Deste modo, o objetivo do trabalho foi considerar a seleção indireta como ferramenta para melhoria simultânea de características radiculares e de parte aérea na cultura do feijão.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a aplicação da seleção indireta em feijão entre caracteres de parte aérea e radicular, foi realizado um experimento a campo na safra 2021/22. A área onde foi implantado o experimento possui solo do tipo Cambissolo Húmico Aluminico Léptico, de textura argilosa (EMBRAPA 2018). A interpretação da análise do solo realizada até a profundidade de 0,40 m indicou: pH = 5,9; teor de matéria orgânica = 3,2%; P = 3,1 mg/dm³ e K = 124,0 mg/dm³. Os teores de fósforo e potássio foram determinados pelo método Mehlich-1 (CQFS-RS/SC 2016).

De acordo com os atributos químicos da área experimental a adubação de manutenção foi realizada com expectativa de produção de 4000 kg ha⁻¹, utilizando a formulação 04 -24 -12 (nitrogênio, fósforo e potássio). Nesta safra, 36 tratamentos foram conduzidos a campo. Os 36 tratamentos foram aleatorizados a campo sob delineamento látice parcialmente balanceado com duas repetições. Neste caso bloco não é sinônimo de repetição, sendo que a área experimental é dividida em blocos com poucos tratamentos (seis), aumentando assim a precisão experimental (GOMEZ & GOMEZ 1985). Esta disposição a campo formou 72 unidades experimentais com dimensões de 4 m² espaçadas 0,5 m entre si.

A densidade de semeadura foi de 13 sementes por metro linear. As práticas de manejo (adubação, controle de pragas, doenças e plantas daninhas seguiram as recomendações técnicas para a cultura do

feijão (FANCELLI & NETO 2007, CQFS-RS/SC 2016). Durante a execução do experimento, a precipitação pluviométrica atingiu 490 mm, as temperaturas mínima, média e máxima registradas foram de 13, 17 e 32° C. Estas informações de tempo foram obtidas pela *NASA POWER Global Meteorology, Surface Solar Energy and Climatology Data Client for R*, presente em SPARKS 2018.

Estes 36 tratamentos foram formados pela combinação de três fatores (genótipos x métodos de fenotipagem de raízes x estádios fenológicos de desenvolvimento). O fator genótipo com seis níveis foi constituído por dois genitores (BAF07 e BRS Embaixador) e quatro progênies advindas da hibridação entres estes genitores, sendo BAF07 x BRS Embaixador nas gerações filiais F₂, F₃, F₄ e F₅. O BAF07 é um acesso pertencente ao banco ativo de germoplasma da Universidade do Estado de Santa Catarina, no Centro de Ciências Agroveterinárias (UDESC/CAV). O BRS Embaixador é uma cultivar do grupo comercial de cores (vermelho), já utilizada para cultivo por produtores nacionais.

O fator método de fenotipagem radicular foi composto pelos métodos “*Shovelomics* e *WinRHIZO*”. O *Shovelomics* assim denominado foi desenvolvido por pesquisadores da *Penn State College of Agricultural Sciences*. Ele permite a fenotipagem de alto rendimento de plantas no campo. A avaliação é realizada posicionando-se as raízes das plantas em um gabarito, e assim são mensuradas as variáveis de interesse (TRACHSEL et al. 2011). O método *WinRHIZO* consiste de um conjunto digitalizador e de um software denominado de Epson Expression 10.000 XL (Regent Instruments Canada Inc.). Nesse método, as raízes das plantas são posicionadas no equipamento e o software mede as variáveis de forma quantitativa, automática e simultânea por meio de uma imagem gerada pelo sistema (PORNARO et al. 2017). O fator estágio fenológico de desenvolvimento foi formado por V₄₋₄ (quatro folhas trifolioladas), R₆ (florescimento pleno) e R₈ (enchimento de grãos), de acordo com a escala fenológica proposta e mais utilizada na cultura do feijão (GEPTS & FERNÁNDEZ 1982).

Quando os genótipos de cada unidade experimental atingiram os estádios fenológicos propostos, foram realizadas avaliações do sistema radicular. Em ambos os métodos, esta etapa consistiu em escavar o solo ao redor do caule da planta a uma distância de 0,25 a 0,30 m a 0,30 m de profundidade para retirar o conjunto solo e raízes. Cinco plantas de feijão (unidade de observação) foram coletadas aleatoriamente de cada unidade experimental. Em seguida, retirou-se o excesso de solo para expor as raízes, realizando a limpeza por imersão em recipientes com água e detergente neutro a 5% (TRACHSEL et al. 2011). Com o método *Shovelomics*, foram quantificadas as variáveis radiculares: *i*) ângulo de raiz basal (AR, °); *ii*) comprimento vertical de raiz (CV, cm); *iii*) comprimento horizontal de raiz/lado esquerdo (CHE, cm) e *iv*) comprimento horizontal da raiz/lado direito (CHD, cm). Pelo método *WinRHIZO*, as variáveis *v*) comprimento total da raiz (CT, cm); *vi*) área radicular projetada (AP, cm²); *vii*) volume da raiz (VL, cm³) e *viii*) diâmetro médio da raiz (DR, mm) foram avaliadas. As variáveis respostas de parte aérea mensuradas foram: teores de clorofila A, B e total (CLA, CLB e CLT; mg L⁻¹), estatura de plantas (EST, cm), diâmetro de caule (DC, mm), altura de inserção do primeiro legume (IPL, cm), número de legumes por planta (NL), número de grãos por planta (NG) e peso de grãos por planta (PG, g). A determinação do peso de grãos foi executada mediante a correção da umidade da massa de grãos para 13%, utilizando estufa de circulação de ar forçado. Os teores de clorofila foram obtidos com o auxílio do medidor portátil Clorofilog (FALKER CFL1030). Estas variáveis agronômicas foram avaliadas em cinco plantas diferentes em cada estágio fenológico proposto, em função do crescimento e desenvolvimento da cultura do feijão de V₄₋₄ até R₈.

Após a coleta das informações, foi realizada a análise descritiva para cada método de fenotipagem, utilizando o procedimento *univariate (proc univariate)*. Posteriormente, foi aplicada a análise de correlação de Kendall Tau-b (τ), considerando o nível de significância de 0,05. A significância das estimativas de correlação foi obtida pelo teste Z, sendo H₀: $\tau = 0$ e H_a: $\tau \neq 0$. A correlação de Kendall foi utilizada por se tratar de uma medida não paramétrica baseada no número de concordâncias e discordâncias em observações pareadas, apropriadas para a situação deste trabalho (KOWALSKI 1972). Após a obtenção das matrizes de correlação, as estimativas de τ foram particionadas em efeitos diretos e indiretos, por meio da análise de trilha. Estas análises foram executadas no software SAS Studio®, disponível na plataforma SAS OnDemand for Academics e no software GENES® (CRUZ 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva de média, desvio e erro padrão da média para as 13 características avaliadas nas unidades de observação com o método de fenotipagem radicular *Shovelomics*, foram representadas na Tabela 1. A média das características relacionadas ao sistema radicular variou de 10,83 (CHD), 11,53 (CHE), 24,56 (CV) e 65,5 (AR). Os comprimentos horizontais esquerdo e direito apresentaram valores próximos. Isso indicou uma simetria na formação horizontal do sistema radicular em ambos os lados.

A formação do sistema radicular está associada ao gravitropismo. Este por sua vez tem estreita relação com o ângulo de raiz basal (AR). O desenvolvimento da massa de raízes em camadas superficiais do solo (ângulo de raiz em torno de 180°) é um indicativo de que o solo apresenta maior disponibilidade de nutrientes nesta profundidade ou a maior eficiência genotípica na aquisição destes nutrientes. Já a disposição de um sistema radicular desenvolvido em camadas mais profundas do solo (ângulo de raiz basal próximo a 90°), e conseqüentemente maior comprimento de raiz vertical indica que o solo possivelmente é escasso na quantidade de elementos minerais em camadas superficiais ou os genótipos são pouco eficientes na sua aquisição, sendo necessário aprofundar o sistema radicular (BURRIDGE et al. 2020).

Nas características mensuradas acima do solo, se observou valores de estatura de plantas e diâmetro de caule elevados (87 e 7,87), respectivamente. As plantas com maior estatura têm maior capacidade de formação de legumes, sendo necessário o desenvolvimento de um diâmetro do caule capaz de suportar a carga granífera. Além disso, a altura de inserção do primeiro legume foi próxima a 0,20 m indicando a redução de perdas com a colheita mecanizada (maior distância dos grãos em relação ao solo). Estas características contribuem para otimizar e potencializar o número de legumes, o número de grãos e peso de grãos por plantas, contribuindo com o rendimento de grãos como um todo (DIANATMANESH et al. 2022).

Tabela 1. Estatística descritiva de média (\bar{x}), desvio (Sd) e erro padrão da média (Ep), para as 13 variáveis respostas considerando o método de fenotipagem Shovelomics.

Table 1. Descriptive statistics of mean (\bar{x}), deviation (Sd) and mean standard error (Ep), for the 13 response traits considering the Shovelomics phenotyping method.

Característica	\bar{x}	Sd	Ep
AR	65,51	16,43	1,22
CV	24,56	8,75	0,65
CHE	11,53	7,04	0,52
CHD	10,83	6,99	0,52
CLA	42,22	9,24	0,69
CLB	11,05	4,62	0,34
CLT	53,27	12,74	0,95
EST	86,82	70,54	5,25
DC	7,86	1,92	0,14
IPL	18,76	13,15	0,98
NL	20,19	13,82	1,02
NP	90,23	53,58	3,99
PG	26,86	11,68	0,87

Características: ângulo de raiz basal (AR); comprimento vertical de raiz (CV); comprimento horizontal de raiz/lado esquerdo (CHE); comprimento horizontal de raiz/lado direito (CHD); teores de clorofila A, B e total (CLA, CLB e CLT), estatura de plantas (EST), diâmetro de caule (DC), altura de inserção do primeiro legume (IPL), número de legumes por planta (NL), número de grãos por planta (NG) e peso de grãos por planta (PG).

Para a grande maioria das características foram observados valores de erro padrão da média baixos (próximos a zero). Os valores de erro e desvio padrão da média para as variáveis número de grãos por planta e estatura de plantas foram respectivamente de 3,99; 53,58 e 5,25 e 70,54. Esta maior variação dos dados em relação à média para estatura e altura de inserção do primeiro legume pode ser explicada pelo componente genético. Isso porque os genitores utilizados são contrastantes para estas características agrônômicas. O genitor BAF 07 pertence ao grupo gênico mesoamericano, característico pela formação de sementes pequenas (25 - 30 g / 100 sementes), hábito de crescimento indeterminado e faseolina do tipo "S", predominantemente. Já o BRS Embaixador faz parte do grupo gênico andino, apresentando maior massa de sementes (30 - 35 g/ 100 sementes), hábito de crescimento determinado e faseolina do grão do tipo "T" (BEEBE et al. 2013). Em função da divergência entre os genitores, é comum ter a variabilidade de plantas nas progenies segregantes, em especial em gerações iniciais de autofecundação (F2).

Do mesmo modo, na Tabela 2 se destacou a análise descritiva considerando o método de fenotipagem WinRHIZO. Em termos de média, se observou que as características do sistema radicular apresentaram outra magnitude de medida, comparativamente àquelas obtidas pelo método Shovelomics. Este fato ocorre em função do método de fenotipagem. As avaliações radiculares no método WinRHIZO são obtidas pela quantificação de uma imagem gerada pelo sistema por meio do software específico, contrariamente ao método Shovelomics, em que as características são mensuradas manualmente (TRACHSEL et al. 2011, PORNARO et al. 2017).

Tabela 2. Estatística descritiva de média (\bar{x}), desvio (Sd) e erro padrão da média (Ep) para as 13 variáveis respostas considerando o método de fenotipagem WinRHIZO.

Table 2. Descriptive statistics of mean (\bar{x}), deviation (Sd) and mean standard error (Ep) for the 13 response traits considering the WinRHIZO phenotyping method.

Característica	Ep	Sd	Ep
CT	800	310,63	23,15
AP	42,36	13,92	1,037
VL	1748	783	59,03
DR	0,54	0,11	0,08
CLA	41,92	9,48	0,70
CLB	11,28	4,95	0,36
CLT	53,21	13,61	1,01
EST	78,30	29,17	2,17
DC	7,86	1,54	0,11
IPL	19,02	7,30	0,54
NL	19,39	11,20	0,83
NG	86,14	53,64	3,99
PG	26,42	12,94	0,96

Características: comprimento total da raiz (CT); área radicular projetada (AP); volume da raiz (VL); diâmetro médio da raiz (DR); teores de clorofila A, B e total (CLA, CLB e CLT), estatura de plantas (EST), diâmetro de caule (DC), altura de inserção do primeiro legume (IPL), número de legumes por planta (NL), número de grãos por planta (NG) e peso de grãos por planta (PG).

Em função da forma de avaliação e da diversidade entre os genótipos (fixos = genitores comparativamente a segregantes = progênies), se observam maiores valores de desvio e erro padrão da média para as características comprimento total, volume e área projetada de raízes. Em termos de um ideótipo para o melhoramento genético de características radiculares, incrementos no comprimento e no volume de raízes, associado com a redução do diâmetro médio dessas raízes conduz a formação de genótipos mais eficientes na aquisição de recursos em condições limitantes, em função da maior exploração do solo (APPIAH-KUBI et al. 2022).

Ademais da estimativa dos valores fenotípicos das características radiculares e de parte aérea, avaliadas em cada método de fenotipagem radicular, foram representados na Figura 1, as estimativas dos coeficientes de correlação de Kendall Tau-b (τ) entre as características agrônômicas. Estas estimativas apresentam relevância em programas de melhoramento genético pois permitem o cálculo do grau de associação entre os caracteres, advindos do efeito genético e de ambiente (CRUZ et al. 2012). De forma geral, se observa uma associação entre duas características quando mudanças em uma delas provoca alterações na outra característica (CARVALHO et al. 2004). A interpretação da análise de correlação é fundamentada em três aspectos, sendo: magnitude, direção e significância. A magnitude de uma estimativa de correlação diz respeito ao seu valor numérico propriamente dito, variando de -1 a 1. A direção indica se a associação é positiva ou negativa. Já a significância indica se o valor obtido difere ou não de zero, sendo fundamentado pelo teste Z (NOGUEIRA et al. 2012).

Considerando o método Shovelomics, foi observado uma variação na magnitude das estimativas de correlação (τ) de -0,22 a 0,85. Neste sentido, algumas características estão fortemente associadas de forma positiva e outras de forma contrária. Os maiores valores de correlação obtidos foram entre os teores de clorofila (CLA x CLB, $\tau = 0,60$; $p = 0,0001$); (CLA x CLT, $\tau = 0,85$; $p = 0,0001$); (CLB x CLT, $\tau = 0,78$; $p = 0,0001$); número e peso de grãos por planta (NG x PG, $\tau = 0,70$; $p = 0,0001$). Estas estimativas elevadas de correlação (próximas a 1), salientam o êxito obtido dos programas de melhoramento na seleção de plantas com características melhoradas de parte aérea, principalmente voltadas ao rendimento de grãos (PEREIRA et al. 2013).

Dentre as características radiculares, se observou uma associação negativa e significativa entre ângulo de raiz basal e comprimento vertical ($\tau = -0,16$; $p = 0,005$) e entre os comprimentos horizontais esquerdo e direito ($\tau = 0,37$; $p = 0,001$). Estes valores de correlação salientam que plantas com maior comprimento vertical de raízes apresentam menor ângulo de raiz basal, ou seja, apresentam um sistema radicular com desenvolvimento em profundidade no solo. A associação positiva entre os comprimentos horizontais esquerdo e direito de raízes indicam a simetria de desenvolvimento horizontal do sistema radicular.

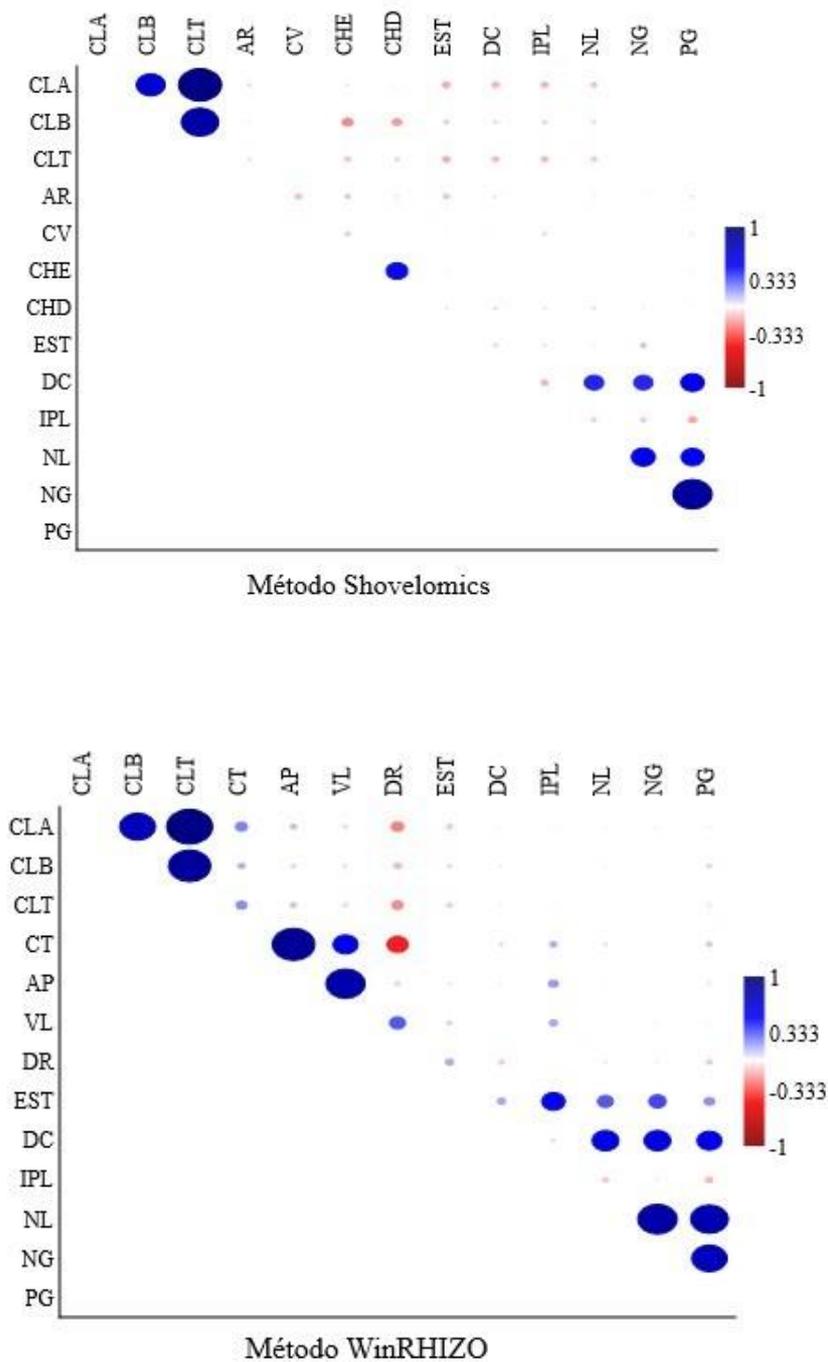


Figura 1. Estimativas de coeficientes de correlação de Kendall Tau-b (τ) entre as 13 variáveis respostas para cada um dos métodos de fenotipagem radicular.

Figure 1. Estimates of kendall's correlation coefficients (τ) between the 13 response variables for each of the root phenotyping methods.

Em relação a associação entre características da parte aérea com as de sistema radicular, foram observadas duas estimativas de correlação significativas, entre o teor de clorofila B com comprimento horizontal esquerdo ($\tau = -0,22$; $p = 0,0011$) e com o comprimento horizontal direito ($\tau = 0,20$; $p = 0,0012$). Outro trabalho com a cultura do feijão, em que as raízes foram avaliadas pelo método Shovelomics, indicou associação negativa e significativa de $r = -0,52$ entre ângulo de raiz basal com massa fresca de parte aérea (VELHO et al. 2017). As associações significativas entre características de parte aérea com as de sistema radicular podem beneficiar a seleção de plantas nas etapas de condução de populações segregantes, já que variáveis acima do solo apresentam relativa facilidade de medida, comparativamente àquelas ocultas.

As estimativas de correlação obtidas pelo método de fenotipagem *WinRHIZO*, também destacadas na Figura 1, variaram de -0,33 a 0,91. Nesta figura se observa a associação significativa e positiva entre os teores de clorofilas (CLA, CLB e CLT), bem como entre as variáveis de componentes produtivos, como número de legumes, número de grãos e peso de grãos por planta. Dentre as características radiculares, foi verificado uma associação positiva e significativa entre comprimento total da raiz com a área projetada ($\tau = 0,71$; $p = 0,0001$) e com o volume de solo explorado pelo sistema radicular ($\tau = 0,40$; $p = 0,0001$). Isso indica que plantas com maior comprimento radicular possuem maior área projetada e por consequência, maior volume de solo é explorado para a captação de recursos. As variáveis comprimento total e volume de raízes apresentaram associação negativa com diâmetro médio de raízes, salientando que o desenvolvimento de um sistema radicular denso, volumoso, acarreta na formação de raízes finas, com menor diâmetro.

Em relação a associação entre sistema radicular e parte aérea, as três características relacionadas aos teores de clorofila apresentaram associação positiva com comprimento radicular (CLA x COMP, $\tau = 0,24$; $p = 0,0002$), (CLB x COMP, $\tau = 0,18$; $p = 0,0004$) e CLT x COMP, $\tau = 0,23$; $p = 0,0001$) e associação negativa com diâmetro médio de raízes (CLA x DR, $\tau = -0,21$; $p = 0,001$), (CLB x DR, $\tau = -0,20$; $p = 0,0001$), CLT x DR, $\tau = -0,23$; $p = 0,0001$). As variáveis radiculares comprimento total, área projetada e volume de raízes apresentaram associação positiva e significativa com a altura de inserção do primeiro legume (CT x IPL, $\tau = 0,15$; $p = 0,0431$; (AP x IPL, $\tau = 0,20$; $p = 0,0127$) e VL x IPL, $\tau = 0,18$; $p = 0,018$). Já a característica diâmetro médio de raízes apresentou associação com a estatura de plantas (DR x EST, $\tau = 0,16$; $p = 0,006$).

Estes resultados são de extrema importância, pois vão de acordo com a seleção do ideótipo de feijão tanto para sistema radicular quanto para a parte aérea. Considerando a temática de selecionar plantas de feijão com características simultaneamente melhoradas de parte aérea e sistema radicular visando a mitigação do efeito de estresses abióticos, a seleção indireta é uma ferramenta chave para acelerar o processo de melhoramento, com vistas a descartar os genótipos pouco promissores, direcionando os esforços naqueles considerados superiores agronomicamente (PEREIRA et al. 2013).

O conhecimento da relação entre características é de grande valia no melhoramento genético, principalmente se os caracteres possuem baixa herdabilidade ou forem difíceis de se fenotipar. Como forma de complementar as estimativas de correlação, pode-se estimar a relação de causa e efeito entre os caracteres (Tabelas 3 e 4). Isso é obtido pela análise de trilha, que consiste no estudo dos efeitos diretos e indiretos dos caracteres sobre uma variável básica (CARVALHO et al. 2004). O somatório dos efeitos diretos e indiretos resulta no valor da estimativa de correlação entre as características consideradas.

Deste modo, na Tabela 3 foi representada a partição das estimativas de correlação em efeitos diretos e indiretos sobre as variáveis básicas comprimento horizontal esquerdo e direito de raízes considerando o método de fenotipagem *Shovelomics*. Esta tabela indica a partição dos valores de correlação entre (CHE e CHD) x CLB, ou seja, sistema radicular *versus* parte aérea.

Considerando a característica comprimento horizontal esquerdo de raízes, se observou elevado efeito direto de CLB (0,555), porém com sinal contrário, ou seja, existem outras características que atuam na associação entre CHE e CLB (CRUZ et al. 2012). Por exemplo, se destacou o elevado efeito indireto do teor de clorofila total (-1,550) sobre estimativa de correlação entre CHE x CLB. Já para a correlação entre CHD e CLB, se constatou elevado efeito direto de CLB (-0,422). Isso indica que a característica CLB com efeito direto e de mesmo sinal que CHD é a principal responsável por esta correlação, facilitando a seleção direta, ou seja, plantas com menor teor de clorofila B, apresentam sistema radicular desenvolvido horizontalmente no perfil do solo. Os teores de clorofila são diretamente ligados a eficiência fotossintética das plantas, promovendo o maior crescimento e desenvolvimento.

A análise das diferenças fenotípicas em relação aos teores de clorofila, conjuntamente ao desenvolvimento radicular auxilia no entendimento não somente de como as características fotossintéticas influenciam o sistema radicular, mas também favorecem a identificação de genótipos superiores que podem ser utilizados nos programas de melhoramento genético voltados ao desenvolvimento de cultivares adaptadas a ambientes marginais (com limitação de recursos) (SUÁREZ et al. 2021).

Com base nisso, a observação desta associação entre os teores de clorofila e desenvolvimento radicular é útil no momento da fenotipagem a campo em programas de melhoramento genético, já que atualmente, a mensuração dos teores de clorofila é fácil de ser executada, com equipamentos portáteis e sem a destruição das plantas a campo, facilitando a escolha dos melhores genótipos (SÁNCHEZ-REINOSO et al. 2019).

O desdobramento em efeitos diretos e indiretos das estimativas de correlação obtidas considerando o método de fenotipagem radicular *WinRHIZO*, foram expostas na Tabela 4, com as variáveis comprimento total e diâmetro médio de raízes designadas como principais. Para o valor de correlação entre CT x CLA, $\tau =$

0,24, se observou elevado efeito direto da característica CLA (2,26) e efeitos indiretos de CLB (0,76) e AP (0,13).

Tabela 3. Estimativas dos efeitos diretos e indiretos considerando as variáveis comprimento horizontal esquerdo e direito como principais, para o método de fenotipagem Shovelomics.

Table 3. Estimates of direct and indirect effects considering the left and right horizontal length variables as the main ones, for the Shovelomics phenotyping method.

	CHE		CHD
Efeito direto CLB	0,555	Efeito direto CLB	-0,422
<u>Efeitos indiretos</u>		<u>Efeitos indiretos</u>	
CLA	0,947	CLA	-0,253
CLT	-1,550	CLT	0,570
AR	-0,005	AR	0,001
CV	-0,002	CV	0,008
CHD	-0,078	CHE	-0,108
EST	-0,040	EST	-0,003
DC	-0,060	DC	0,011
IPL	0,003	IPL	-0,005
NL	0,002	NL	-0,005
NG	-0,004	NG	0,001
PG	0,003	PG	0,001
Total	- 0,22	Total	- 0,20
Coefficiente de determinação (R ²)	0,31		0,29
Efeito da variável residual (EvR)	0,88		0,83

Características: ângulo de raiz basal (AR); comprimento vertical de raiz (CV); comprimento horizontal de raiz/lado esquerdo (CHE); comprimento horizontal de raiz/lado direito (CHD); teores de clorofila A, B e total (CLA, CLB e CLT), estatura de plantas (EST), diâmetro de caule (DC), altura de inserção do primeiro legume (IPL), número de legumes por planta (NL), número de grãos por planta (NG) e peso de grãos por planta (PG).

Tabela 4. Estimativas dos efeitos diretos e indiretos considerando as variáveis comprimento total e diâmetro médio de raízes como principais, para o método de fenotipagem WinRHIZO.

Table 4. Estimates of direct and indirect effects considering the main variables total length and mean diameter of roots, for the WinRHIZO phenotyping method.

CT		DR	
Efeito direto CLA	2,26	Efeito direto EST	0,045
<u>Efeitos indiretos</u>		<u>Efeitos indiretos</u>	
CLB	0,760	CLA	-0,871
CLT	-2,970	CLB	-0,325
AP	0,130	CLT	1,250
VL	0,019	AP	0,058
DR	0,077	VL	0,181
EST	-0,017	DR	-0,160
DC	-0,001	DC	-0,001
IPL	0,006	IPL	-0,025
NL	0,002	NL	-0,001
NG	-0,011	NG	0,013
PG	-0,013	PG	0,004
Total	0,24	Total	0,16
Coefficiente de determinação (R ²)	0,92		0,80
Efeito da variável residual (EvR)	0,25		0,30

Características: comprimento total da raiz (CT); área radicular projetada (AP); volume da raiz (VL); diâmetro médio da raiz (DR); teores de clorofila A, B e total (CLA, CLB e CLT), estatura de plantas (EST), diâmetro de caule (DC), altura de inserção do primeiro legume (IPL), número de legumes por planta (NL), número de grãos por planta (NG) e peso de grãos por planta (PG).

O valor elevado do efeito direto indica a melhoria simultânea e conjunta de CT e CLA, ou seja, plantas com maior teor de clorofila A, apresentam maior comprimento total de raízes. Este efeito direto é ideal para a seleção de plantas agronomicamente superiores. Por outro lado, para a estimativa de correlação entre DR x EST, foi verificado um efeito direto baixo, próximo a nulo da característica estatura de plantas sobre o diâmetro médio de raízes. Isto indica que a estimativa de $\tau = 0,16$ entre as variáveis foi advinda

preponderantemente de efeitos indiretos, advindos das características CLT (1,250) e volume de solo ocupado pelo sistema radicular (0,181). Este fato salienta que melhorias no sistema radicular podem ser executadas tanto de forma direta (seleção de plantas com maior teor de clorofila A), quanto de forma indireta (pela seleção de plantas com teores melhorados de clorofila total e maiores valores de volume de solo ocupado pelas raízes). A possibilidade de seleção de plantas com características melhoradas para sistema radicular considerando caracteres de parte aérea torna-se atrativa pela facilidade de se executar a fenotipagem a campo, promovendo melhorias na otimização dos custos e recursos do programa de melhoramento genético (PEREIRA et al. 2013).

Os resultados deste trabalho indicaram que para ambos os métodos de fenotipagem radicular recomenda-se a mensuração simultânea de características de parte aérea voltadas a fisiologia das plantas. Dessa forma, a avaliação e quantificação da resposta das plantas a condições de cultivo com indicativo de melhoria simultânea de caracteres é aconselhável em programas de melhoramento genético, almejando o desenvolvimento de genótipos mais eficientes agronomicamente para a interceptação da energia luminosa e a absorção de água e elementos minerais (GOLTSEV et al. 2012).

No que se trata do desenvolvimento de genótipos mais eficientes na aquisição de recursos, plantas sob estresse hídrico por exemplo apresentam uma ampla gama de respostas de ordem morfológica, fisiológica, bioquímica e molecular. Somado a isso, a diminuição do teor de clorofila em estresse hídrico rotineiramente tem sido considerada como um sintoma de estresse oxidativo, podendo ser resultante da foto-oxidação e degradação do pigmento fotossintético (ZANDALINAS et al. 2018, SÁNCHEZ-REINOSO et al. 2019).

A consideração sobre a natureza e a magnitude de associações existentes entre características agrônomicas é notavelmente relevante, já que o melhoramento genético vegetal preocupa-se em desenvolver genótipos melhorados não para apenas uma característica, mas para um conjunto delas concomitantemente. Este conhecimento das associações torna-se um subsídio de valor inestimável para os melhoristas de plantas, principalmente voltados a definição dos procedimentos mais eficientes para a seleção das plantas mais adaptadas. No melhoramento genético a correlação entre características pode ser afetada por efeitos pleiotrópicos dos genes (genes que controlam a manifestação de uma ou mais características simultaneamente) ou por falta de equilíbrio de ligação (VENCOVSKY & BARRIGA 1992).

As estimativas de correlação são geralmente condicionadas pelos efeitos aditivos dos genes, no quais afetem mais de um caráter simultaneamente. Felizmente, o melhoramento de plantas autógamas (feijão) é regido pela ação gênica aditiva, facilitando dessa maneira a fixação de caracteres e os ganhos com a seleção (MUKANKUSI et al. 2019). No entanto em razão dos baixos valores de correlação ($> 0,50$), estimados para a associação entre características radiculares e de parte aérea, pontos importantes devem ser considerados, como a avaliação de uma amostra representativa da população, a utilização de baixa pressão de seleção, principalmente em gerações iniciais de endogamia (F2, F3) e a consideração de estimativas de herdabilidade que representam a proporção da variância fenotípica total de uma característica que é devida a herança dos genes, aumentando a eficiência da seleção visual dos caracteres.

CONCLUSÃO

Foram evidenciadas relações lineares significativas entre as características de parte aérea e as de sistema radicular em populações segregantes de feijão. Há efeito direto do teor de clorofila A sobre o comprimento total de raízes e efeitos indiretos do teor de clorofila total sobre os comprimentos radiculares horizontais esquerdo e direito. Desse modo, a seleção direta e indireta via teores de clorofila podem promover melhorias simultâneas para caracteres radiculares em feijão, visando o desenvolvimento de genótipos adaptados agronomicamente a condições adversas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsas e auxílio financeiro na execução de projetos de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- APPIAH-KUBI D et al. 2022. Heat Stress Tolerance: A Prerequisite for the Selection of Drought- and Low Phosphorus-Tolerant Common Beans for Equatorial Tropical Regions Such as Ghana. *Plants* 11: 1-16.
- BARILI LD et al. 2011. Correlação fenotípica entre componentes do rendimento de grãos de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.). *Semina: Ciências Agrárias* 32: 1263-1274.

- BEEBE SE et al. 2013. Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology* 4: 1-20.
- BISATO M et al. 2021. Early performance of common bean cultivars submitted to different sowing depths. *Revista de Ciências Agroveterinárias* 20: 118 -127.
- BULYABA R et al. 2020. Genotype by location effects on yield and seed nutrient composition of common bean. *Agronomy* 10: 1-16.
- BURRIDGE JD et al. 2020. Comparative phenomics of annual grain legume root architecture. *Crop Science* 60: 2574 - 2593.
- CARVALHO IF et al. 2004. Estimativas e implicações da correlação no melhoramento vegetal. Pelotas: UFPel. 142p.
- CQFS-RS/SC. 2016. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Núcleo Regional Sul: Comissão de química e fertilidade do solo. 376p.
- CRUZ CD. 2013. GENES - A software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum* 35: 271-276.
- CRUZ CD et al. 2012. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa: UFV. 512p.
- DA ROCHA F et al. 2014. Análise dialélica como ferramenta na seleção de genitores em feijão. *Revista Ciência Agrônômica* 45: 74 - 81.
- DIANATMANESH M et al. 2022. Yield and yield components of common bean as influenced by wheat residue and nitrogen rates under water deficit conditions. *Environmental Technology and Innovation* 28: 102549.
- EMBRAPA. 2018. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5.ed. Brasília: Embrapa. 355p.
- FANCELLI AL & NETO DD. 2007. Produção de feijão. Piracicaba: Esalq. 224p.
- GEPTS P & FERNÁNDEZ F. 1982. Etapas de desarrollo de la planta de frijol comum (*Phaseolus vulgaris* L.). Cali: CIAT.
- GOLTSEV V et al. 2012. Drought-induced modifications of photosynthetic electron transport in intact leaves: Analysis and use of neural networks as a tool for a rapid non-invasive estimation. *Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics* 1817: 1490-1498.
- GOMEZ KA & GOMEZ AA. 1985. Statistical procedures for agricultural research. Philippines: International Rice Research Institute. 690p.
- KARAVIDAS I et al. 2022. Agronomic Practices to Increase the Yield and Quality of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A Systematic Review. *Agronomy* 12: 2.
- KOWALSKI CJ. 1972. On the effects of non-normality on the distribution of the sample product-moment correlation coefficient. *Journal of the Royal Statistical Society* 21: 1-12.
- MARSHALL AH et al. 2016. A new emphasis on root traits for perennial grass and legume varieties with environmental and ecological benefits. *Food and Energy Security* 5: 26 - 39.
- MUKANKUSI C et al. 2019. Genomics, genetics and breeding of common bean in Africa: A review of tropical legume project. *Plant Breeding* 138: 401- 414.
- NOGUEIRA APO et al. 2012. Análise de trilha e correlações entre caracteres em soja cultivada em duas épocas de semeadura. *Bioscience Journal* 28: 877-888.
- PEREIRA FB et al. 2013. Relação entre os caracteres determinantes das eficiências no uso de nitrogênio e fósforo em milho. *Revista Ceres* 60: 636-645.
- PORNARO C et al. 2017. WinRHIZO technology for measuring morphological traits of bermudagrass stolons. *Agronomy Journal* 109: 3007-3010.
- ROCHA JR et al. 2019. Selection of superior inbred progenies toward the common bean ideotype. *Agronomy Journal* 111: 1181-1189.
- SÁNCHEZ-REINOSO AD et al. 2019. Drought-tolerant common bush bean physiological parameters as indicators to identify susceptibility. *Hort Science* 54: 2091-2098.
- SCHNEIDER HM et al. 2020. Should Root Plasticity Be a Crop Breeding Target? *Frontiers in Plant Science* 11: 1-16.
- SPARKS AH. 2018. Nasapower: a NASA POWER global meteorology, surface solar energy and climatology data client for R. *Journal of Open Source Software* 3: 1-3.
- STROCK CF et al. 2019. Field Crops Research Seedling root architecture and its relationship with seed yield across diverse environments in *Phaseolus vulgaris*. *Field Crops Research* 237: 53-64.
- SUÁREZ JC et al. 2021. Influence of nitrogen supply on gas exchange, chlorophyll fluorescence and grain yield of breeding lines of common bean evaluated in the Amazon region of Colombia. *Acta Physiologiae Plantarum* 43: 1-15.
- TRACHSEL S et al. 2011. Shovelomics: High throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. *Plant and Soil* 341: 75-87.
- VELHO LPS et al. 2017. Phenotypic correlation and direct and indirect effects of aerial part components with root distribution of common bean. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 52: 5.
- VENCOVSKY R & BARRIGA P. 1992. Genética biométrica no fitomelhoramento. Ribeirão Preto: SBG. 496p.
- ZANDALINAS SI et al. 2018. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Physiologia Plantarum* 162: 2-12.