

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CAMPUS BALSAS
CURSO DE AGRONOMIA

RAILANE OLIVEIRA FRANÇA

**RELAÇÕES DE CAUSA E EFEITO ENTRE OS COMPONENTES DE PRODUÇÃO
DE BIOMASSA DO SORGO COM O ÍNDICE SPAD**

Balsas

2023

RAILANE OLIVEIRA FRANÇA

**RELAÇÕES DE CAUSA E EFEITO ENTRE COMPONENTES DO DE PRODUÇÃO
DE BIOMASSA DO SORGO COM O ÍNDICE SPAD**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Campus Balsas da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Francisco Charles dos Santos Silva.

Balsas

2023

F815r

França, Railane Oliveira

Relações de causa e efeito entre os componentes de produção de biomassa do sorgo com o índice SPAD. Railane Oliveira França/. – Balsas, 2023.

28f.

Monografia do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA / Balsas, 2023.

Orientador: Professor Francisco Charles dos Santos Silva

1. Sorghum bicolor. 2. Biomassa. 3. Herdabilidade. 4. Correlações. 5. Análise de Trilha. I. Título.

CDU: 631.84

RAILANE OLIVEIRA FRANÇA

**RELAÇÕES DE CAUSA E EFEITO ENTRE COMPONENTES DE PRODUÇÃO
DE BIOMASSA DO SORGO COM O ÍNDICE SPAD**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia
do Campus Balsas da Universidade Estadual do
Maranhão, como requisito para obtenção do Título
de Bacharel em Agronomia.

Aprovada em 26/06/2023

BANCA EXAMINADORA

Francisco Charles dos Santos Silva

Prof. Dr. Francisco Charles dos Santos Silva (Orientador)

Engenheiro Agrônomo, Dr. em Fitotecnia
Universidade Estadual do Maranhão

Alan Mario Zuffo

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo

Engenheiro Agrônomo, Dr. em Fitotecnia
Universidade Estadual do Maranhão

Leandra Matos Barrozo

Prof. Dra. Leandra Matos Barrozo

Engenheira Agrônoma, Dra. Em Agronomia
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me conceder a oportunidade de concluir esta fase, por ter me dado força e perseverança nos momentos em que pensei em desistir e por me permitir crescer tanto espiritualmente, academicamente e profissionalmente.

À minha família, em especial aos meus pais Lucilene e João Alberto, ao meu irmão João Felipe e a minha filha Emanuelle que é a minha maior motivação.

À Universidade Estadual do Maranhão – Campus Balsas e todos os seus colaboradores, pela contribuição à minha formação acadêmica e pessoal, em especial aos amigos em que nessa casa fiz, obrigado pela amizade e troca de conhecimento.

Aos meus colegas Cicero Augusto, e Maria Lusiane, e às mestrandas Jemima e Raianara que participaram da condução do experimento, tornando cada momento mais leve e feliz. Meus agradecimentos em especial a minha amiga Maria Lusiane por todo o suporte e companheirismo no decorrer do curso.

Gostaria de agradecer em especial, ao meu orientador Francisco Charles, por sua paciência, atenção, compreensão e auxílio durante todo o desenvolvimento do trabalho. Desejo que continue trilhando o caminho do sucesso e que eu possa de alguma forma, retribuir tudo o que recebi.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito do trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A cultura do sorgo apresenta uma baixa herdabilidade para o caráter produção de biomassa, o que dificulta a obtenção de ganhos genéticos pela seleção direta desta variável. No entanto, através da seleção indireta em outros caracteres é possível atingir maior eficiência e progresso na seleção. Para tanto, utilizou-se o índice SPAD, indicativo da intensidade do verde das folhas, obtido através do clorofilômetro modelo Minolta SPAD-502. O trabalho teve objetivo associar a produção de biomassa de cultivares de sorgo com o índice SPAD utilizando da técnica de análise de trilha. O ensaio foi conduzido na unidade de pesquisa agrícola da Universidade Estadual do Maranhão, localizada no município de Balsas-MA, onde foram avaliados dez genótipos de sorgo. As variáveis número de dias para o florescimento (NDF), ciclo total (CT), stande final (SF), graus Brix (GB), número de folhas (NF), diâmetro do colmo (DC), índice SPAD, altura de planta (AP), área foliar (AF), índice de área foliar (IAF), produção de matéria fresca (PMF) e produção de matéria seca (PMS) foram avaliadas quanto ao grau de colinearidade, apresentaram multicolinearidade severa. Para contornar este resultado, utilizou-se a metodologia de regressão em crista. Os resultados obtidos tornam explícita a importância de se realizar o desdobramento das correlações em efeitos diretos e indiretos antes da tomada de decisões baseadas apenas nos estudos de correlações. O índice SPAD é útil para a seleção indireta do índice de área foliar de plantas de sorgo, no entanto não foram identificadas relações de causa e efeito relevantes entre o índice SPAD e os demais componentes de rendimento forrageiro do sorgo.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*; biomassa; herdabilidade; correlações; análise de trilha.

ABSTRACT

The sorghum crop has a low heritability for the biomass production character, which makes it difficult to obtain genetic gains through the direct selection of this variable. However, through indirect selection on other characters it is possible to achieve greater efficiency and progress in selection. For that, the SPAD index was used, indicative of the intensity of the green of the leaves, obtained through the chlorophyll meter model Minolta SPAD-502. The objective of this work was to associate the biomass production of sorghum cultivars with the SPAD index using the path analysis technique. The test was treated at the agricultural research unit of the State University of Maranhão, located in the municipality of Balsas-MA, where ten sorghum genotypes were evaluated. As a variable number of days to flowering (NDF), total cycle (CT), final stand (SF), Brix degrees (GB), number of leaves (NF), stem diameter (DC), SPAD index, plant height (AP), leaf area (AF), leaf area index (LAI), fresh matter production (PMF) and dry matter production (PMS) were evaluated for the degree of collinearity, showing severe multicollinearity. To avoid this result, use the crest regression methodology. The results obtained explicitly show the importance of performing the spontaneous correlations in direct and indirect effects before making decisions motivated only in studies of correlations. The SPAD index is useful for the indirect selection of the leaf area index of sorghum plants, however, no relevant cause and effect relationships were identified between the SPAD index and the other components of sorghum forage yield.

Key Words: *Sorghum bicolor*; biomass; heritability; correlations; path analysis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1 Cultura do sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>).....	7
2.2 Índice SPAD (<i>Soil Plant Analysis Development</i>).....	9
2.3 Correlação	9
2.4 Análise de trilha	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5 CONCLUSÃO	21
REFERÊNCIAS	22

1 INTRODUÇÃO

Na cultura do sorgo a capacidade de produção de biomassa é um caráter complexo resultante da expressão e interação de vários genes, o que resulta em baixa herdabilidade. Esse fenômeno, em um programa de melhoramento, dificulta a obtenção de ganhos genéticos pela seleção direta da variável.

Todavia, a seleção indireta para aumento de um caráter complexo, como produção de biomassa, pode permitir maior eficiência e progresso na seleção quando efetuada em outros caracteres a ele correlacionados, mas que sejam de fácil mensuração e de alta herdabilidade (RIOS et al., 2012) como é o caso do índice SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) indicativo da intensidade do verde das folhas, que é altamente correlacionado com o teor de clorofila das folhas, obtido por um medidor portátil, de forma fácil e rápida (PÔRTO et al., 2011; NOGUEIRA et al., 2018).

Uma maneira de identificar o modo como duas variáveis estão interrelacionadas se dá pelo coeficiente de correlação, esse estabelece o grau de associação existente entre as variáveis, e quanto maior for, maior será a relação entre as variáveis analisadas e vice-versa (VERMA, 2020). Entretanto, a quantificação e a interpretação da magnitude de uma correlação podem, contudo, resultar em equívocos na estratégia de seleção, pois uma correlação alta entre dois caracteres pode ser resultado do efeito, sobre estes, de um terceiro ou de um grupo de caracteres (CRUZ; REGAZZI, 1994).

Com o intuito de entender melhor as causas envolvidas nas associações entre caracteres, algumas técnicas podem ser utilizadas, como exemplo a análise de trilha (“*path analysis*”) (WRIGHT, 1921), a qual possibilita quantificar a influência direta de uma variável sobre a outra, independente das demais, no contexto de causa e efeito, auxiliando para um melhor entendimento das relações entre caracteres agronômicos, e se torna imprescindível para identificação das relações que contribuam para melhor expressão do potencial produtivo.

Esta técnica tem sido amplamente aplicada no ramo das ciências agrárias, visto que serve de auxílio para a tomada de decisões e impulsiona a produtividade de diversas culturas (SOUSA et al., 2022). Existe um grande número de trabalhos publicados com a cultura do sorgo na literatura. No entanto, são escassos trabalhos voltados para o estudo da correlação do índice SPAD com os componentes de produção do sorgo.

Para tanto, o estudo foi conduzido objetivando mensurar os efeitos diretos e indiretos dos componentes de produção de biomassa do sorgo com o índice SPAD.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do sorgo (*Sorghum bicolor*)

O *Sorghum bicolor* [L.] Moench) pertence à família das gramíneas, é uma planta herbácea monocotiledônea, de origem tropical, bem adaptada a regiões semiáridas.

É uma espécie de ciclo C₄, apresentando altas taxas fotossintéticas, se adapta bem a diversas regiões, e produz razoavelmente bem sob condições desfavoráveis, fornecendo níveis de PB (proteína bruta) entre 8% e 15% e NDT (nutrientes digestíveis totais) entre 60% e 70% (MARTINI et al., 2019). O sorgo dispõe de colmo ereto, apoiado em um sistema radicular muito resistente com raízes seminais e adventícias, apresenta também folhas alternadas compostas por bainha e lâmina foliar originadas dos nós individuais, onde o número de folhas varia de 7 a 30. A inflorescência é chamada de panícula, ao qual apresenta eixo central, onde dá origem as ramificações primárias, secundárias e terciárias, nas ramificações finais encontram-se os racemos ou espiguetas, podendo ser a panícula compactada ou aberta (SANTOS et al., 2005; SILVA et al., 2021).

É uma planta tolerante às condições de forte estresse ambiental, como a seca, devido ao seu sistema radicular bem desenvolvido, extenso e fibroso e por possuir atributos de uma planta xerófila, como uma camada espessa de cutina nas folhas e a ausência de pilosidade, que permite reduzir a perda de água para o ambiente através da transpiração. Detêm um importante papel na alimentação animal, sendo utilizada de inúmeras formas, como pastejo, corte verde e silagem, e apresenta atributos de produtividade, adaptabilidade a condições edafoclimáticas e digestibilidade (FONTES; MOURA FILHO, 1979; SILVA et al., 2021).

Auxilia na produção pecuária de bovinos visando aumentar a produtividade dos sistemas de produção, por fornecer uma boa qualidade de forragem (FERNANDES et al., 2020) e seu grão também é empregado como um substituto do milho na produção de rações para os animais, por possuir um melhor custo/benefício (FAUSTINO et al., 2018). Existem diferentes tipos de sorgo, dentre eles estão: forrageiro, sacarino, granífero, biomassa e vassoura.

O sorgo forrageiro vem suprimindo a necessidade de forragem verde durante o verão, pois mostra melhor eficiência do uso da água e adaptações resistentes à seca, além de menor demanda por fertilizantes (BHAT, 2019). É habitualmente empregado no estágio vegetativo, produz mais matéria seca em relação aos demais, apresenta caules grossos e é muito utilizado para ensilagem (REZENDE et al., 2020; RIBEIRO et al., 2017). Existe no mercado híbridos de sorgo forrageiro que possuem desenvolvimento limitado pela emissão da panícula com grãos

viáveis, e aqueles com um expressivo crescimento vegetativo, alta capacidade de perfilhamento, rebrota, ciclo maior e, com isso, a emissão tardia de uma panícula com pouco ou nenhum grão (PAZIANI et al., 2020).

O sorgo sacarino tem sido cotado como uma alternativa para a geração de energia, sendo uma fonte renovável na produção de etanol, e pode ser empregada como uma cultura complementar à cana-de-açúcar (EMYGDIO et al., 2011; OLIVEIRA, 2021). Apresenta inúmeras vantagens no sistema de produção, diminuindo a ociosidade das indústrias canavieiras, ocupando o espaço de entressafra da cana-de-açúcar, permitindo a rotação de culturas, otimizando a produção de etanol e maximizando o uso de todo o parque de equipamentos voltados a produção de etanol a partir da cana (SILVA et al., 2020).

O tipo granífero, é utilizado na alimentação animal na forma de farelo e também é empregado em várias regiões do mundo na alimentação humana. Para fins de alimentação humana e de aves, não deve haver a presença de tanino nos grãos. É considerado o tipo de maior importância econômica, quando comparado aos demais, devido as atuais conjunturas brasileiras, onde o sorgo se mostra como uma viável alternativa para o milho na alimentação animal e aves em virtude do aumento da oferta do grão no mercado nacional nos últimos anos, graças à sua composição bromatológica similar ao milho (TABOSA et al., 2019).

O sorgo biomassa é tido como opção de alto potencial produtivo por área, sendo capaz de produzir grandes quantidades de forragem no curto espaço de tempo (CORDEIRO et al., 2021). Apresenta alta produtividade de massa verde, possibilitando assim o seu uso como biomassa, devido ao grande acúmulo de lignina em seu caule e o baixo teor de umidade, tornando-o uma excelente matéria prima para a cogeração de energia, em virtude do seu alto poder de combustão (SIMEONE et al., 2018).

O emprego de biomassa lignocelulósica se mostra como uma das fontes mais bem-sucedidas para a geração de energia. Com isso a cultura do sorgo biomassa é apontada como uma alternativa promissora em relação a outras culturas utilizadas para fins energéticos (CARRILLO et al., 2014; SILVA et al., 2022).

O tipo vassoura se caracteriza por apresentar panícula laxa de ráquis curta e longas ramificações, sendo utilizada para a fabricação de vassouras (FAVARATO et al., 2011). A panícula é a parte mais utilizada para a produção das vassouras, as sementes podem servir de alimento para os animais domésticos, como por exemplo, as aves, e os colmos e folhas podem ser utilizados como cobertura morta ou na compostagem de resíduos vegetais (FOLTRAN et al., 2016).

2.2 Índice SPAD (Soil Plant Analysis Development)

Entre os nutrientes, o nitrogênio é o principal responsável pelo acréscimo da produção de forragem, principalmente nas espécies com elevado potencial produtivo, e este nutriente mineral está relacionado positivamente com o elevado crescimento e desenvolvimento da parte aérea, devido à otimização dos processos de fotossíntese (JARVIS et al., 1995).

Por sua vez, o teor de clorofila é um indicador do nível de nitrogênio nas plantas e o teor de N nas folhas está altamente correlacionado com a produtividade devido a associação entre a atividade fotossintética e o teor de N nas folhas (ZUFFO et al., 2012).

Existem diversos métodos para determinação do teor de clorofila, e por consequência o teor de nitrogênio. Métodos comuns demandam a destruição das folhas, são muito demorados e onerosos, dessa forma, a utilização do índice SPAD possibilita uma avaliação rápida e prática (JESUS; MARENCO, 2008). O clorofilômetro *Soil Plant Analysis Development* (SPAD-502, Minolta) é um aparelho portátil e permite leituras que são capazes de se relacionar com o teor de clorofila presente na folha. As mensurações são instantâneas, com baixo custo, podendo ser realizada à campo (VEIGA et al., 2009; SINGH et al., 2010). As informações que são apresentadas no visor do aparelho são medidas indiretas da clorofila presente na folha (MALAVOLTA et al., 1997).

A correlação entre o índice SPAD e o teor de N já foi efetuada em inúmeros trabalhos (TORRES-NETTO et al., 2002; TORRES-NETTO et al., 2005; CASTRO et al., 2011; KOLLN, 2012; CASTRO et al., 2014). Rocha et al. (2005) constataram correlações positivas entre o índice SPAD e o teor de N nas folhas de híbridos de milho. Godoy et al. (2008) demonstrou correlação positiva entre índice SPAD e o teor de N em folhas de café. Neste trabalho de Godoy et al. (2008), foi relatado que o clorofilômetro foi eficiente para estimar o teor de N na folha, com correlação significativa e positiva da leitura do aparelho com o estado nutricional associadas ao N de diferentes espécies de plantas, e ao longo do ciclo de desenvolvimento.

2.3 Correlação

Em estatística o termo correlação denota relação em dois sentidos, e é usado para intitular a força que mantém dois conjuntos de valores unidos. Em programas de melhoramento é importante averiguar a existência de associação entre dois ou mais caracteres, para assim, saber se as modificações ocorridas em um dos caracteres são acompanhadas por modificação nos outros. A correlação mensura o grau de associação entre variáveis, onde seu valor pode

variar de -1 a 1, de modo que quanto mais próximo de -1 ou 1 mais forte é a associação (DUTRA, 2018).

A compreensão das correlações entre caracteres se torna essencial quando o objetivo é a seleção de um caráter com baixa herdabilidade. Uma vez que, a seleção indireta, através de caracteres menos complexos e com maior herdabilidade e facilidade de avaliação, é capaz de resultar em maiores avanços genéticos em relação ao uso de seleção direta (KUREK et al., 2001; ANJOS et al., 2012).

Contudo, os coeficientes de correlações entre variáveis permitem ao pesquisador estimar apenas a direção e magnitude da associação entre dois caracteres, ou seja, não permite inferir a influência dos efeitos de um grupo de caracteres sobre uma variável dependente de maior importância (BOTELHO et al., 2019).

Em vista disso, a utilização da análise de trilha é um artifício na seleção indireta de caracteres do sorgo, uma vez que realiza o desdobramento dos coeficientes de correlações, possibilitando a identificação e a obtenção de estimativas de efeitos diretos e indiretos visando uma variável de maior interesse na seleção (PINHEIRO et. al., 2021).

2.4 Análise de trilha

A análise de trilha foi elaborada por Wright (1921), com a finalidade de mensurar as relações de causa e efeito por meio do desdobramento dos coeficientes de correlação, visto que somente a análise dos coeficientes não permitem obter tais conclusões (NOGUEIRA et al., 2012; SILVA, 2020).

No entanto, antes da execução da análise de trilha é necessário o diagnóstico para multicolinearidade dos dados, evitando assim interpretações equivocadas dos resultados. Dessa forma, há dois métodos básicos para a análise de trilha, o primeiro é identificar e excluir variáveis que ocasionam a colinearidade, e o segundo é a adoção da análise de trilha com regressão em crista quando não se deseja eliminar variáveis (SALLA et al., 2015). A presença de multicolinearidade se deve a existência de algum grau de inter-relação entre variáveis independentes, podendo ser do tipo fraca, moderada a forte ou severa (MONTGOMERY; PECK, 1981).

O método de regressão em crista na análise de trilha surgiu com o objetivo de reverter os problemas provocados pela multicolinearidade, onde se faz necessário a adoção de uma constante K, de valor mínimo possível, procurando sempre manter instável os coeficientes de

trilha e preservar o fator de inflação da variância (FIV) menor que 10, em todas as variáveis (RIOS et al., 2012; SILVA, 2020).

Nas ciências agrárias, a análise de trilha tem sido amplamente utilizada para mensurar a correlação de parâmetros para diversas culturas, como milho (FILHO, 2018), arroz (ROCHA et al., 2020) e soja (ZUFFO et al., 2018).

3 MATERIAL E MÉTODOS

No período da segunda safra de 2022 foi conduzido o ensaio na unidade de pesquisa agrícola da Universidade Estadual do Maranhão, localizada no município de Balsas-MA, 07° 31' 57" S de latitude e 46° 02' 08" W longitude. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo tropical quente e úmido (Aw) com estação seca bem definida e precipitação pluviométrica média anual de 1175 mm. O solo da área é classificado como Argissolo Vermelho siltoso.

Foram avaliados dez genótipos de sorgo, sendo eles o AGRI 001-E, AGRI 002-E, BRS PONTA NEGRA, BRS 373, BRS 467-4-2, BR 506, BR 509, BRS 658, BRS 810 e SUDÃO, adotando-se o delineamento experimental de blocos casualizados, com três repetições. Cada parcela experimental foi disposta com 5 linhas, cada uma com 5 m de comprimento, espaçadas a 0,80 m, em uma área total de 40 x 18 m. As duas linhas laterais e a porção de 1 m das extremidades das linhas centrais serviram como bordadura.

A correção do solo foi realizada em função dos resultados da análise de solo, onde foram aplicadas 3,0 toneladas ha⁻¹ de calcário calcítico com 97% de PRNT (poder relativo de neutralização total). A incorporação do corretivo ao solo foi realizada posteriormente, por meio de aração com corte do solo a profundidade de 20 cm. Para o controle das plantas daninhas, em pré-plantio aplicou-se o herbicida com princípio ativo glifosato, a dose de 5 litros ha⁻¹ do produto comercial. Quinze dias após essa aplicação, foi realizada a demarcação da área experimental

Foi adotado o sistema de plantio convencional, com semeadura manual nas linhas. Os tratamentos culturais como controle de pragas, doenças, e adubação de plantio e cobertura, foram conduzidos seguindo as recomendações técnicas para a cultura relatadas por Borém et al. (2014).

Foi realizado o desbaste das plantas excedentes, uma semana após a semeadura, para ajustar à densidade de plantas, de acordo com a densidade recomendada para cada cultivar.

Ao final do ciclo da cultura, que no caso do sorgo corresponde ao momento em que as plantas atingem o estágio de grão-pastoso, foram avaliados:

- Stande Final: contagem das plantas presentes na área útil de cada parcela.
- Graus Brix: mensurado após as plantas atingirem o estágio fenológico de grão pastoso (de acordo com cada cultivar), através da colheita dos colmos das cultivares e na parte mediana da planta, foi avaliado o teor de carboidratos solúveis, por meio do índice °Brix. Para tanto, foi utilizado o refratômetro digital portátil da marca Quimis®, e para a extração do caldo do colmo

foi utilizado o moinho do tipo Willey.

- Número de folhas: contagem manual de todas as folhas de quatro plantas por parcela.

- Área foliar: foi obtida utilizando o método não destrutivo, segundo a metodologia proposta por Hassan et al. (2010), por meio da equação:

$$AF = C \times L \times 0,75$$

Onde: AF – área foliar (cm²); C – comprimento (cm); L – largura (cm). Para isso, o comprimento e a largura de folha foram mensurados em uma folha do terço médio da planta, em quatro plantas por parcela, com o auxílio de uma trena.

- Índice de área foliar: obtido por meio da utilização da seguinte fórmula:

$$IAF = AF / APS$$

Onde: IAF – índice de área foliar; AF - área foliar; APS – área da planta no solo.

- Diâmetro do colmo: mensurado com auxílio de paquímetro digital com precisão de 0,01 milímetros, na altura do primeiro nó contado a partir do solo.

- Número de dias para a floração: número de dias decorridos do plantio até o ponto em que 50% das plantas tenham emitido a panícula.

- Ciclo total: número de dias decorridos do plantio até a data de colheita, que corresponde ao prazo para que as sementes das panículas atinjam o estado pastoso.

- Altura de planta: foi mensurada com auxílio de trena a partir da superfície do solo até o ápice da panícula, em metros.

- Produção de matéria fresca: obtida pela pesagem de todas as plantas (colmos + folhas + panículas) da área útil de cada parcela, as quais foram coletadas pelo corte das mesmas, rente à superfície do solo, na fase de maturidade fisiológica do grão (de acordo com cada cultivar).

- Produção de matéria seca: quantificada pela pesagem do material obtido da secagem em estufa a 65 °C de 500g de matéria fresca triturado.

- Leitura na folha do índice SPAD: obtida pelo uso do clorofilômetro modelo Minolta SPAD-502. As medidas foram tomadas em quatro plantas por parcela. Em cada planta a leitura do índice era realizada em duas folhas, localizadas no meio e no topo do dossel da planta, sendo sempre tomadas no terço médio da folha evitando as bordas e a região da nervura central.

Os dados das variáveis mensuradas foram submetidas à análise de variância ao nível de 5% de probabilidade e as variáveis que apresentaram diferença significativa para o efeito genótipos foram submetidas à análise de correlações, essas, por sua vez, foram submetidas previamente ao diagnóstico de multicolinearidade.

Posteriormente, a análise de trilha foi executada utilizando técnica de análise de regressão em crista ou em cumeeira (CARVALHO, 1995), adotando-se como variável principal

o índice SPAD, sendo os resultados interpretados conforme indicado por Singh e Chaudary (1979), citado por Vencovsky e Barriga (1992).

As análises estatísticas empregadas neste estudo foram realizadas no programa GENES (CRUZ, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os genótipos de sorgo diferiram estatisticamente para todas as variáveis mensuradas o que evidência a presença de variabilidade genética nas populações estudadas. O coeficiente de variação (CV) variou de 2,49% para número de dias para o florescimento (NDF), e 32,35% para índice de área foliar (IAF), sendo que a maioria dos parâmetros avaliados apresentaram valores inferiores a 20%, que é o aceitável para a cultura do sorgo, em experimentos realizados em campo (GURGEL et al., 2013; LIMA et al., 2022) (Tabela 1).

Tabela 1 - Resumo da análise de variância referente ao número de dias para o florescimento (NDF), ciclo total (CT), stande final (SF), graus Brix (GB), número de folhas (NF), diâmetro do colmo (DC), índice SPAD, altura de planta (AP), área foliar (AF), índice de área foliar (IAF), produção de matéria fresca (PMF) e produção de matéria seca (PMS), em experimento conduzido em Balsas – MA

FV	GL	Quadrados médios			
		NDF	CT (dias)	SF	GB
Blocos	2	2,0333	10,0333	46,2333	1,575
Tratamentos	9	326,0037 **	323,7074 **	765,2778 *	55,4824 **
Resíduo	18	2,7370	7,2185	215,5667	3,9824
Média		66,57	86,77	55,17	10,95
CV (%)		2,49	3,10	26,61	18,22
FV	GL	NF	DC (cm)	SPAD	AP (m)
Blocos	2	0,5771	8,5679	1,0591	0,0037
Tratamentos	9	11,9549 **	52,9890 **	872,4501 **	1,6646 **
Resíduo	18	0,5424	3,5826	25,3689	0,5424
Média		10,71	19,61	41,3	2,33
CV (%)		6,88	9,65	12,19	9,91
FV	GL	AF (cm ²)	IAF	PMF (kg)	PMS (kg)
Blocos	2	258,1041	0,7273	10890155,93	2257326,931
Tratamentos	9	32798,957 **	13,8966 **	231029942,932 **	56152793,200 **
Resíduo	18	3848,8847	3,5506	21664708,84	4060331,716
Média		476,95	5,83	25371,46	11536,14
CV (%)		13,01	32,35	18,35	17,47

** e * significativos a 1 e 5% de probabilidade; respectivamente; pelo teste F ns não-significativo; pelo teste F.

Para garantir maior confiabilidade aos resultados da análise de trilha, a matriz de correlação fenotípica entre os caracteres dias para o florescimento, ciclo total, stand final, grau Brix, altura de planta, número de folhas, diâmetro do colmo, área foliar, índice de área foliar, produção de matéria fresca por hectare, produção de matéria seca por hectare e índice SPAD

foram avaliadas quanto ao grau de colinearidade, pelo número de condições proposto por Montgomery e Peck (1981). A matriz de correlação apresentou multicolinearidade severa. Para contornar esse problema, foi utilizada a metodologia de regressão em crista proposta por Carvalho e Cruz (1996).

Diversos autores já relataram que a análise de trilha com regressão em crista é eficiente para minimizar os efeitos de multicolinearidade severa, como Salla et al. (2015), em jaboticaba, Toebe e Cargnelutti Filho (2013), em milho e Carvalho et al. (1999), em pimentão.

A análise de trilha proporciona um conhecimento detalhado das influências dos caracteres envolvidos sobre uma variável tida como principal, demonstrando as relações de causa e efeito, e foi utilizada para determinar os efeitos diretos e indiretos considerando o índice SPAD como variável básica ou principal, e como caracteres dependentes, as variáveis: número de dias para o florescimento (NDF), ciclo total (CT), stande final (SF), graus Brics (GB), altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro do colmo (DC), área foliar (AF), índice de área foliar (IAF), produção de matéria fresca por hectare (PMF) e produção de matéria seca por hectare (PMS) (Figura 1).

Para essa análise, o coeficiente de determinação (R^2) foi equivalente a 0,833, enquanto o efeito residual foi de 0,408. É possível observar que o coeficiente de determinação demonstra que as variáveis estudadas, em conjunto, explicaram 83,3% da variação total observada nas leituras do índice SPAD. Indicando o potencial do índice no auxílio da seleção indireta no melhoramento genético do sorgo.

Figura 1 – Gráfico de análise de trilha com a variável principal SPAD sobre as variáveis básicas ou explicativas: número de dias para o florescimento (NDF), ciclo total (CT), stande final (SF), graus Brics (GB), altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro do colmo (DC), área foliar (AF), índice de área foliar (IAF), produção de matéria fresca por hectare (PMF) e produção de matéria seca por hectare (PMS) obtidas pelo método baseado na regressão em crista ($k=0,359$), em experimento conduzido em Balsas – MA

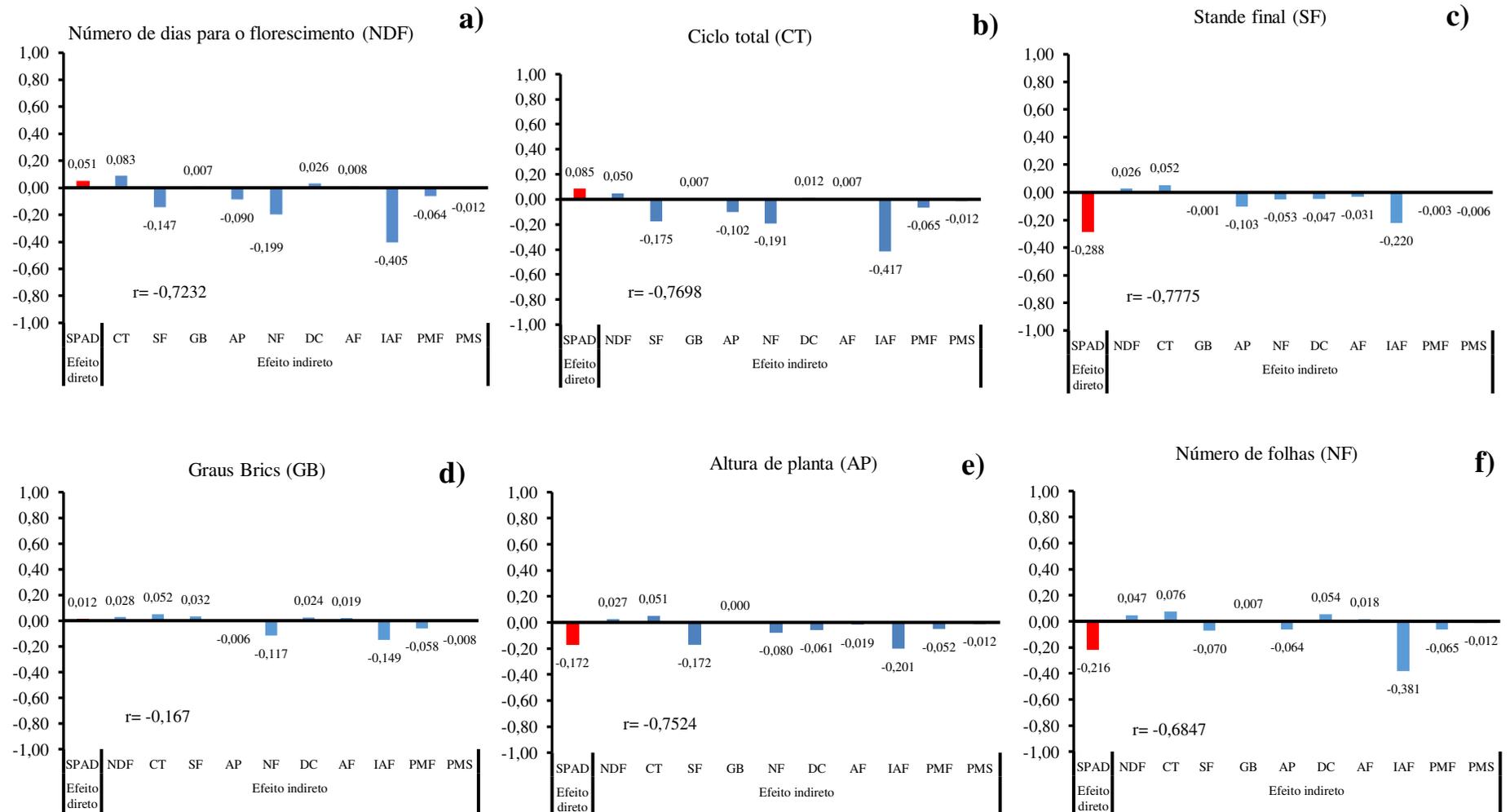
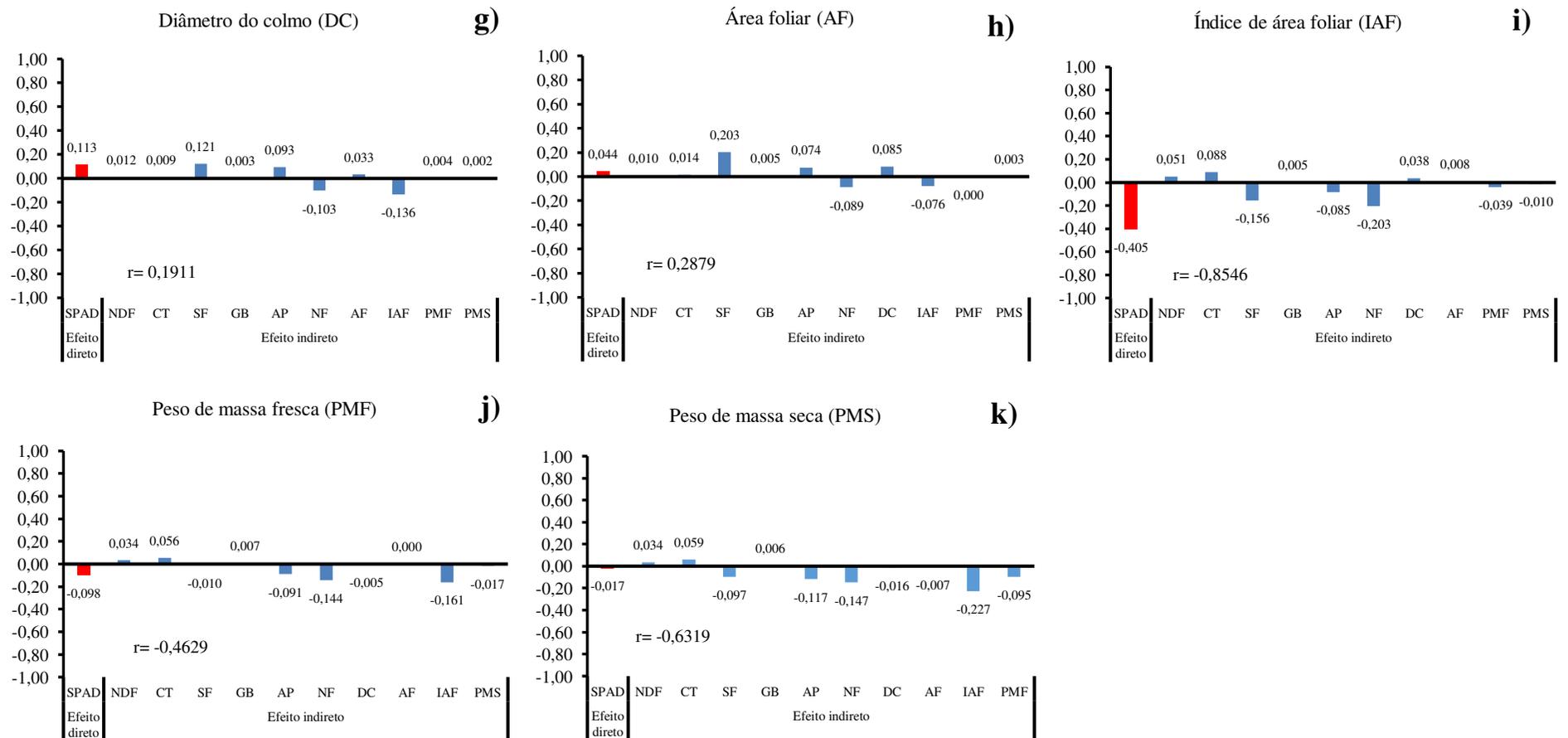


Figura 1 – Gráfico de análise de trilha com a variável principal SPAD sobre as variáveis básicas ou explicativas: número de dias para o florescimento (NDF), ciclo total (CT), stande final (SF), graus Brics (GB), altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro do colmo (DC), área foliar (AF), índice de área foliar (IAF), produção de matéria fresca por hectare (PMF) e produção de matéria seca por hectare (PMS) obtidas pelo método baseado na regressão em crista ($k=0,359$), em experimento conduzido em Balsas – MA



Fonte: a autora (2023)

Como critério para a interpretação da análise de trilha para fins de melhoramento, Severino et al. 2002 sugere determinar, entre os caracteres de alta correlação com a variável básica, aqueles de maior efeito direto em sentido favorável à seleção, afim de que a resposta correlacionada através da seleção indireta seja eficiente. Além disso, para que a uma variável independente seja considerada importante sobre a variável dependente, é necessário que o valor em módulo do seu efeito direto seja maior que o efeito residual.

Para o caráter número de dias para o florescimento, ciclo total e graus Brics, observou-se coeficientes de correlação negativos, mas com efeitos diretos positivos sobre o índice SPAD. Quando os sinais desses coeficientes são opostos, como na situação apresentada, demonstra a inexistência de relação de causa e efeito entre as variáveis. Dessa forma, a seleção de plantas de sorgo via índice SPAD, não implicará em alterações relevantes na data de florescimento, no ciclo total das plantas de sorgo nem no seu teor de açúcar (graus Brics).

Assim como relatado por Salla et al. (2015), estes resultados evidenciam como o estudo de correlações pode levar ao erro, e também corrobora a afirmativa sobre quão importante é fazer o desdobramento das correlações em efeitos diretos e indiretos.

Apesar de sete das onze variáveis dependentes analisadas apresentarem correlações de magnitudes elevadas, acima de 0,6, como o índice SPAD, variável principal, apenas o índice de área foliar apresentou valor numérico do seu efeito direto (-0,40531705) próximo ao valor do efeito da variável residual.

Essas estimativas permitem estabelecer a hipótese da verdadeira existência de uma relação de causa e efeito entre o índice SPAD e o índice de área foliar, de tal forma que, devido ao valor negativo dos parâmetros, a obtenção de cultivares de sorgo com maior índice de área foliar, poderá ser efetuada com a seleção das plantas com menores valores para o índice SPAD.

Os demais caracteres apresentaram efeito direto inferior à variável residual e suas associações podem não ser relevantes com o índice SPAD. Constata-se, portanto, que, apesar da maioria dos caracteres apresentarem altas estimativas de correlação, essas ocorreram por efeitos indiretos de outros caracteres, por exemplo, a correlação da altura de plantas com índice SPAD, de -0,7524, só apresentou esse sentido com essa magnitude, especialmente, devido aos efeitos indiretos do índice de área foliar (-0,20055) e do número de folhas (-0,08016).

A mesma conjuntura é observada para os principais caracteres produtivos do sorgo, a produção de matéria fresca e matéria seca por hectare, em que as correlações observadas (-0,4629 e -0,6319), respectivamente para matéria fresca e matéria seca, foram determinadas principalmente pelos efeitos indiretos do índice de área foliar (-0,16099, -0,14701916) e do

número de folhas (-0,14371, -0,2274234).

Esses resultados divergem da hipótese desse trabalho, que aguardava a identificação das magnitudes das relações de causa e efeito do índice SPAD com os componentes de produção de forragem do sorgo. Visto que, diversos estudos demonstram que para espécies anuais existe uma correlação positiva entre o índice SPAD e o teor de clorofila, e esta, por sua vez, é proporcional à concentração de nitrogênio foliar e à produtividade em várias culturas produtoras de grãos, como se observa para o milho (MAGALHÃES et al., 2009; AMARANTE, 2010), arroz (GHOLIZADEH et al., 2011), trigo (FIOREZE; RODRIGUES, 2012) e feijoeiro (ANJOS et al., 2017).

Os resultados obtidos tornam explícita a importância de se realizar o desdobramento das correlações em efeitos diretos e indiretos antes da tomada de decisões baseadas apenas nos estudos de correlações. Sendo necessários ainda, mais estudos que busquem elucidar a natureza fisiológica da ausência de efeitos diretos relevantes do índice SPAD com os componentes de rendimento de forragem do sorgo, que foram identificadas nesse trabalho.

5 CONCLUSÃO

Existe variabilidade para os componentes de produção de sorgo forrageiro entre as cultivares analisadas.

O índice SPAD é útil para a seleção indireta do índice de área foliar de plantas de sorgo.

Não foram identificadas relações de causa e efeito relevantes entre o índice SPAD e os demais componentes de rendimento forrageiro do sorgo.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, D. D. N *et al.* Avaliação do feijoeiro comum em função dos bioestimulantes, NPK e micronutrientes em Vitória da Conquista – BA. **Revista Agrarian**. v. 10, n. 35, p. 1-9, 2017.
- ANJOS, R. S. R *et al.* Análise de Trilha para os Componentes de Produção de Grãos em Variedades de Milho Tropical. **XXIX Congresso Nacional de Milho e Sorgo**, 2012.
- BHAT, B. V. Breeding forage sorghum. *Breeding Sorghum for Diverse End Uses*, Hyderabad, India, p. 175–191, 2019.
- BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. **Sorgo: do plantio a colheita**. Editora UFV, 275 p, 2014.
- BOTELHO, H. A. *et al.* Application of morphometric measures in estimation of body weight and discrimination of *Astyanax lacustris* and *Astyanax fasciatus*. **Aquaculture Research**, v. 50, n. 9, p. 2429-2436, 2019.
- CARRILLO, M. A., STAGGENBORG, S. A. PINEDA, J. A. Washing sorghum biomass with water to improve its quality for combustion. **Fuel**, p. 427-431, 2014.
- CARVALHO, C. G. P. D.; OLIVEIRA, V. R., CRUZ, C. D.; CASALI, V. W. D. Análise de trilha sob multicolinearidade em pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.4, p 603-613, 1999.
- CARVALHO, S. P. de. **Métodos alternativos de estimação de coeficientes de trilha e índices de seleção, sob multicolinearidade**. Viçosa: UFV, p. 163, 1995.
- CASTRO, F. A *et al.* Relationship between photochemical efficiency (JIP-test parameters) and portable chlorophyll meter readings in papaya plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, p. 295-304, 2011.
- CASTRO, F. A *et al.* Portable chlorophyll meter (PCM-502) values are related to total chlorophyll concentration and photosynthetic capacity in papaya (*Carica papaya* L.). *Theor. Exp. Plant Physiol*, p. 201–210, 2014.
- CORDEIRO, M. W. S *et al.* Silagens de forrageiras tropicais adaptadas às condições do semiárido. **Nucleus Animalium**, v. 13, n. 1, p. 5-25, 2021.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. UFV, 1994.
- CRUZ, C. D. Genes Software – extended and integrated with the R, Matlab and Selegen. **Acta Scientiarum**. v. 38, n. 4, p. 547-552, 2016.
- DUTRA, S. M. F. **Análise multivariada para caracterização e divergência de genótipos e correlação entre caracteres em milho**. 2018. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2018.

EMYGDIO, B. M *et al.* Desempenho de cultivares de sorgo sacarino para a produção de etanol sob diferentes densidades de plantas. **Embrapa Clima Temperado - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** (INFOTECA-E), 2011.

FAUSTINO, F. T *et al.* Utilização da silagem de grão de sorgo reidratado na alimentação animal. **Nucleus Animalium**, v. 10, n. 2, 2018.

FAVARATO L. F *et al.* Avaliação de linhagens de sorgo vassoura na região de Viçosa, MG, Brasil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 1, p. 82-86, 2011.

FERNANDES, B. P *et al.* Aspectos relacionados ao potencial forrageiro do sorgo: Revisão. **PUBVET**, v.14, n.7, p.1-7, 2020.

FILHO, A. J. C. **Estimação de parâmetros genéticos e análise de trilha em uma população de milho com potencial para seleção recorrente**. 2018. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas) - da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

FOLTRAN, D. E.; SAWAZAKI, E.; FREITAS, R. S. **Novos cultivares de sorgo vassoura para agricultura regional**. Pesquisa e Tecnologia, vol. 13, n. 1, 2016.

FONTES, L. A. N., MOURA F. W. Calagem e adubação. **Inf. Agrop**, p. 17-19, 1979.

GODOY, L. J. G *et al.* Índice relativo de clorofila e o estado nutricional em nitrogênio durante o ciclo do cafeeiro fertirrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 217-226, 2008.

GUIMARÃES, D. P *et al.* Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc) para o sorgo granífero no Brasil. **EMBRAPA**, 2020.

GURGEL, F. L.; FERREIRA, D. F.; SOARES, A. C. S. O coeficiente de variação como critério de avaliação em experimentos de milho e feijão. BÉLEM: **Embrapa Amazônia Oriental-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, p. 80, 2013.

HASSAN, M *et al.* Non-destructive estimation of maize leaf area, fresh weight, and dry weight using length and leaf width. **Communications in Biometry and Crop Science**, v. 5, n.1, p. 19-26, 2010.

JARVIS, S. C.; SCHOLEFIELD, D.; PAIN, B. F. **Nitrogen Cycling in Grazing Systems**. In: BACON, P. E. (Ed.) Nitrogen Fertilization in the Environment. New York: Marcel Dekker Inc., p. 381-419, 1995.

JESUS, S. V.; MARENCO, R. A. O SPAD-502 como alternativa para a determinação dos teores de clorofila em espécies frutíferas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, n. 4, p. 815-818, 2008.

KÖLLN, O. T. **Interação entre os estresses de nitrogênio e disponibilidade hídrica no fracionamento isotópico de ¹³C e na produtividade em soqueira de cana-de-açúcar**. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, University of São Paulo, Piracicaba, 2012.

- KUREK, A. J *et al.* Análise de trilha como critério de seleção indireta para rendimento de grãos em feijão. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 7, n. 1, p. 29-32, 2001.
- LIMA B. B *et al.* Análise de trilha para seleção indireta de sorgo forrageiro com base nas características morfológicas na região do Alto Sertão Sergipano. **Revista Agri-Environmental Sciences**, v. 8, 2022.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p. 319, 1997.
- MARTINI *et al.* Características morfogênicas e estruturais do sorgo forrageiro submetido a lotação contínua com novilhos de corte suplementados. **Ciência Animal Brasileira**, v. 20, p. 1-11, 2019.
- MONTGOMERY D. C.; PECK E. A. Introduction to linear regression analysis. New York, **John Wiley**, p. 504, 1981.
- NOGUEIRA, A. P.O *et al.* Análise de trilha e correlações entre caracteres em soja cultivada em duas épocas de semeadura. **Jornal de Biociências**. v. 28, n. 6, p. 877-888, 2012.
- NOGUEIRA, B. B *et al.* Índice SPAD em plantas de tomateiro cultivado em fibra de coco e submetido a pulsos de fertirrigação. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12, p. 1-6, 2018.
- OLIVEIRA, C. T. Cultura do sorgo sacarino: revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, 2021.
- PAZIANI, S. F *et al.* Sorgos “gigantes” para silagem. **Brazilian Journal of Development**, v. 6(12), p. 99936-99946, 2020.
- PINHEIRO, S. L *et al.* Análise de trilha da massa da espiga de milho e seus atributos físicos. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, 2021.
- PÔRTO, M. L *et al.* Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio na cultura da abobrinha. **Horticultura Brasileira**, p. 311-315, 2011.
- REZENDE, R. P *et al.* Does intercropping maize with forage sorghum effect biomass yield, silage bromatological quality and economic viability? **Research, Society and Development**, 2020.
- RIBEIRO, M. G *et al.* Silage quality of sorghum and *Urochloa brizantha* cultivars monocropped or intercropped in different planting systems. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 39(3), p. 243–250, 2017.
- RIOS, S. D. A *et al.* Análise de trilha para carotenoides em milho. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 59, n. 3, p. 368-373, 2012.
- ROCHA, G *et al.* Características morfoagronômicas na colheita principal e na soca e análise de trilha em tipos especiais de arroz. **Cultura Agronômica**, v. 29, n. 1, p. 38-49, 2020.

- ROCHA, R. N. C *et al.* Relação do índice spad, determinado pelo clorofilômetro, com teor de nitrogênio na folha e rendimento de grãos em três genótipos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete lagoas, v. 4, p. 161-171, 2005.
- SALLA, V. P *et al.* Análise de trilha em caracteres de frutos de jabuticabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 218-223, 2015.
- SANTOS *et al.* *Melhoramento de sorgo*. In BORÉM A. (org). Melhoramento de espécies cultivadas, Viçosa: UFV, p. 605-658, 2005.
- SEVERINO L. S *et al.* Associação da produtividade com outras características agronômicas do café (*Coffea arabica* L. “Catimor”). **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 24(5), p. 1467-1471, 2002.
- SILVA, D. A *et al.* Desempenho agrônômico de híbridos de sorgo biomassa avaliados na mesorregião centro-sul mato-grossense. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, 2022.
- SILVA, F. D *et al.* Características morfológicas, melhoramento genético e densidade de plantio das culturas do sorgo e milho: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, 2021.
- SILVA, K. C. **Potencial de genótipos de sorgo forrageiro para o sertão sergipano**. 2020. Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) – Universidade Federal de Sergipe, Nossa Senhora da Glória, 2020.
- SILVA, P. C *et al.* Produtividade e características biométricas de sorgo sacarino sob torta de filtro. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 10, p. 78212-78226, 2020.
- Simeone, M. L. F *et al.* Produção e caracterização de pellets de sorgo biomassa. **Brazilian Applied Science Review**, p. 1682-1695, 2018.
- SINGH, V *et al.* Need based nitrogen management using the chlorophyll meter and leaf colour chart in rice and wheat in South Asia: a review. **Nutrient Cycling in Agroecosystem**, Dordrecht, v. 88, n. 3, p. 361-380, 2010.
- SOUSA, F. R *et al.* Análise de trilha de atributos de um Latossolo manejado sob semeadura direta. **Nativa, Sinop**, v. 10, n. 3, p. 366-372, 2022.
- SOUZA, T. V *et al.* Relações entre componentes de rendimento e características morfológicas de milho. **Magistra**, v. 26, n. 4, p. 493-504, 2017.
- TOEBE, M.; CARGNELUTTI FILHO, A. Não normalidade multivariada e multicolinearidade na análise de trilha em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 466-477, 2013.
- TABOSA, J. N *et al.* Importância do melhoramento genético de diferentes tipos de sorgo para as mesorregiões do Agreste, Sertão e afins do Semiárido Brasileiro. **Embrapa**, 2019.

TORRES-NETTO, A *et al.* Portable chlorophyll meter for the quantification of photosynthetic pigments, nitrogen and the possible use for assessment of the photochemical process in *Carica papaya* L. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 14(3), p. 203–210, 2002.

TORRES-NETTO, A *et al.* Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll *a* fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Sci Hortic**, 2005.

VEIGA, F. L *et al.* Avaliação dos Teores foliares de Clorofila, com o uso do SPAD-502, em função de cultivares e de regulador de crescimento em Algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 7, 1988. **Anais**, Paraná, p. 1186-1190, 2009.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. Genética biométrica no fitomelhoramento. Ribeirão Preto, SP: **Revista Brasileira de Genética**, p. 496, 1992.

VERMA, V. Correlation and path analysis for seed yield and components traits in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 9(1), p. 2278-2280, 2020.

WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 20, n. 7, p. 557-585, 1921.

ZUFFO, M. A *et al.* Correlações e análise de trilha em cultivares de soja cultivadas em diferentes densidades de plantas. **Cultura Agrônômica**, v. 27, n. 1, p. 78-90, 2018.

ZUFFO, M. A *et al.* Eficiência na determinação indireta do nitrogênio foliar a partir do índice SPAD. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 802, 2012.