



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO**



PPGAA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE BALSAS - CESBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA**

RAIANARA ANDRADE DOS SANTOS

**ADAPTABILIDADE, ESTABILIDADE E COEFICIENTE DE REPETIBILIDADE EM
ENSAIOS DE SORGO EM BALSAS-MA**

BALSAS - MA

2022

RAIANARA ANDRADE DOS SANTOS

**ADAPTABILIDADE, ESTABILIDADE E COEFICIENTE DE REPETIBILIDADE
EM ENSAIOS DE SORGO EM BALSAS-MA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CB/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Charles dos Santos Silva

Coorientadora: Valéria Xavier de Oliveira Apolinário

RAIANARA ANDRADE DOS SANTOS

**ADAPTABILIDADE, ESTABILIDADE E COEFICIENTE DE
REPETIBILIDADE EM ENSAIOS DE SORGO EM BALSAS-MA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CB/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador (a): Prof. Dr. Francisco Charles dos Santos Silva
Coorientadora: Valéria Xavier de Oliveira Apolinário

Aprovada em 16 / 12 / 2022

BANCA EXAMINADORA

Francisco Charles dos Santos Silva
(Orientador)

Valéria Xavier de Oliveira Apolinário
(Coorientadora)

Alan Mario Zuffo
(Membro externo ao programa)

*Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime,
pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.*

(Josué 1:9)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, que é a razão de tudo e sempre me deu fôlego, forças e ânimo para enfrentar os desafios da vida.

A minha família, meus pais, Marinete Lima de Andrade e Arnaldo Ferreira dos Santos, que sempre me deram apoio e suporte em cada etapa da minha vida. A meu companheiro, Elly Jonhson da Silva Sobrinho Souta, que sempre acreditou no meu potencial e me deu forças quando precisei e ao meu filho, Joel Vinícius Andrade Souta, que faz meus dias melhores e que me inspira a ser melhor a cada dia. A vocês todo meu amor e gratidão.

Ao meu Orientador, Francisco Charles dos Santos Silva, a qual tenho imensa gratidão e respeito e que sempre esteve disponível, me proporcionando aprendizados profissionais e pessoais, a qual levarei por toda vida. Obrigada por acreditar em mim.

A minha Coorientadora Valéria Xavier de Oliveira Apolinário, que sempre com muito animo e disposição contribuiu com a realização dessa pesquisa.

A minha amiga e companheira de sorço, Jemima Campelo de Sousa, que o mestrado me proporcionou e que sempre me mostrou que dá pra encarar os problemas com leveza e tranquilidade. Obrigada pela parceria de sempre.

A UEMA *Campus* Balsas, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, pela oportunidade da realização do curso de mestrado.

A Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Maranhão (FAPEMA), pela bolsa de estudo concedida durante o curso.

Enfim, obrigado a todos que direta e indiretamente fizeram parte dessa etapa importante da minha vida profissional.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1** - Área de estudo localizada no município de Balsas, Maranhão. 17
- Figura 2** - Dados de temperatura média (°C) e precipitação pluvial (mm) durante os meses de execução do experimento em Balsas no ano de 2021 e 2022 (INMET, 2022).
..... 18
- Figura 3** - Desempenho médio vs. estabilidade dos genótipos de sorgo (G1- IPA SUDAN 4202, G2- AGRI 001-E, G3- AGRI 002-E, G4- BRS 658, G5- BRS 810, G6- BRS P NEGRA) para produção de matéria seca nas safras 2021 (A1) e 2022 (A2). 29
- Figura 4** - Desempenho dos genótipos quanto a PMV e PMS através dos ambientes. . 30

CAPÍTULO 2

- Figura 1** - Área de estudo localizada no município de Balsas, Maranhão. 38
- Figura 2** - Dados de temperatura média (°C), e precipitação pluvial (mm) durante os meses de execução do experimento em Balsas no ano de 2021 e 2022 (INMET, 2022).
..... 39

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Atributos químicos do solo da área experimental.	18
Tabela 2 - Código, espécies, aptidão agrônômica e mantenedor das cultivares avaliadas.	19
Tabela 3 - Análise de deviance (ANADEV) e significância pelo Teste da Razão de Verossimilhança (LRT) para os efeitos de genótipos e interações dos genótipos de sorgo avaliados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA.....	23
Tabela 4 - Coeficientes de variação genotípica (CVg%) e experimental (CVe%) e coeficiente de variação da relativa (CVr) dos genótipos testados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA para produção de matéria seca (PMS).	23
Tabela 5 - Componentes de variância (REML Individual), coeficientes de determinação e coeficientes de variação referentes à análise dos genótipos avaliados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA para produção de matéria seca (PMS).	24
Tabela 6 - Estimativas dos efeitos genotípicos (g), valores genotípicos preditos (u + g), ganho genético e valor genotípico médio nos vários ambientes (u + g + gem) para produção de matéria seca avaliados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA.	26
Tabela 7 - Estimativas de MHVG e PRVG para os dos genótipos de sorgo nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA quanto a PMS.....	26
Tabela 8 - Estimativas de MHPRVG para os dos genótipos de sorgo avaliados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA quanto a PMS.	27

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Atributos químicos do solo da área experimental.	39
Tabela 2 - Cultivares avaliadas nas safras 2021 e 2022 no município de Balsas – MA	40
Tabela 3 - Estimativa da repetibilidade (r) e coeficiente de determinação (R ²) das variáveis avaliadas em genótipos de sorgo.....	44
Tabela 4 - Número mínimo de repetições ($\eta_{_O}$) necessário para predizer o valor real dos indivíduos (genótipos) para cada variável, com base nos coeficientes de determinação (R ²) pré-estabelecidos.	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivos específicos	11
CAPÍTULO 1. ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE GENÓTIPOS DE SORGO VISANDO A PRODUÇÃO DE BIOMASSA PELO MÉTODO REML/BLUP E GGEBILOT	13
RESUMO	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. METODOLOGIA.....	17
2.1 Área de estudo	17
2.2 Delineamento experimental.....	18
2.3 Análises de adaptabilidade e estabilidade	20
2.3.1 REML/BLUP.....	20
2.3.2 GGE Biplot.....	21
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1 ANADEV e Componentes de variância (REML)	23
3.2 Componentes de Média (BLUP)	25
3.3 Estimativas de MHVG, PRVG e MHPRVG.....	26
3.4 GGE Biplot	28
4. CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS	32
CAPÍTULO 2. REPETIBILIDADE E NÚMERO DE REPETIÇÕES EM GENÓTIPOS DE SORGO EM BALSAS-MA	35
RESUMO	35
ABSTRACT	36
1. INTRODUÇÃO.....	37
2. METODOLOGIA.....	38
2.1 Área de estudo	38
2.2 Delineamento experimental.....	39
2.3 Análise de repetibilidade	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4. CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

O sorgo é o quinto cereal mais cultivado no mundo, após o trigo, o arroz, o milho e a cevada, sendo cultivado em regiões tropicais e semiáridas (MENEZES, 2021a). A importância desta cultura está relacionada com seus múltiplos usos, tais como produção de grãos, forragem, vassoura, álcool e biomassa e vem destacando-se principalmente na produção de grãos e forragem.

É uma cultura que apresenta ciclo curto (90 a 120 dias), alto rendimento e tolerância ao estresse hídrico, adaptada principalmente a regiões ou situações em que o déficit hídrico oferece riscos para outras culturas como o milho, por exemplo (MENEZES *et al.*, 2021b). Tais características possibilitam ao sorgo elevada produção de biomassa, mesmo em condições edafoclimáticas limitantes, além, de baixos custos de produção.

A cultura ganhou destaque no Brasil, evidenciado pelo aumento de 36,9% (2,85 milhões de toneladas) na produção nacional e 19,4% (1,03 milhão de hectares) na área de cultivo do sorgo no Brasil. Tendo-se ainda a expectativa de aumento de produtividade (3,8%) e de produção (4%) de sorgo no Cerrado Maranhense para a safra de 22/23 (CONAB, 2022).

Diante desse contexto, o sorgo se torna uma alternativa viável para ajudar a solucionar a carência nutricional enfrentada por pequenos e médios pecuaristas que têm encontrado dificuldades para alimentar seu rebanho em função da elevação, de cerca de 80%, nos preços da soja e do milho (CEPEA, 2021), inflação ocorrida principalmente em função da pandemia da COVID-19 (SCHNEIDER *et al.*, 2020), da oferta e demanda de bens, das condições climáticas adversas e, mais recentemente, o conflito bélico no Leste Europeu (POSSAMAI e SERIGATI, 2022).

Todavia, para a seleção e a recomendação de genótipos para Balsas-MA, localizado no Cerrado Sul Maranhense é fundamental o estudo da interação genótipo x ambiente (GxA), com a finalidade de analisar a adaptabilidade e estabilidade das cultivares, por meio dos quais torna-se possível a identificação dos genótipos com comportamentos previsíveis (estáveis) e que respondam às variações ambientais (adaptados) (CRUZ e REGAZZI, 2001).

Entretanto, para implantação de ensaios experimentais é relevante determinar quantas medições são necessárias em cada indivíduo para que a seleção fenotípica entre os genótipos seja feita com eficiência e com mínimo custo (CRUZ, REGAZZI e

CARNEIRO, 2012). Esse número de medições pode ser estimado por meio do coeficiente de repetibilidade.

Desta forma, o conhecimento do coeficiente de repetibilidade pode ser útil, pois os experimentos fazem parte de uma etapa bastante onerosa em função da elevada demanda por mão de obra, área e recursos financeiros para condução dos experimentos e a redução do número de avaliações pode resultar em uma diminuição dos custos com baixo impacto nos ganhos com o melhoramento (SILVA, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a adaptabilidade, estabilidade e o coeficiente de repetibilidade de genótipos de sorgo em Balsas-MA.

2.2 Objetivos específicos

- i. Verificar qual cultivar ou conjunto de cultivares de sorgo forrageiro que apresenta melhores condições para a produção de forragem em Balsas-MA;
- ii. Recomendar genótipos de sorgo para Balsas-MA;
- iii. Estimar o número de repetições necessárias para obter estimativas confiáveis de repetibilidade em ensaios de sorgo em Balsas-MA.

REFERÊNCIAS

CEPEA - **CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada**. (2021). <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/soja.aspx>> Acesso em: 7 mai. 2021.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. (2.ed.) rev. Viçosa: UFV, 2001.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4 Ed., Editora UFV, Viçosa, 2012. 514 p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2022/23 - primeiro levantamento. Brasília – DF: **Conab**, v. 10, n. 1, outubro 2022.

MENEZES, C. B.; SILVA, K. J.; SANTOS, C. V. Melhoramento Genético de Sorgo Granífero. In: MENEZES, C. B. **Melhoramento genético de sorgo**. – Brasília, DF: Embrapa, 2021a. p. 217-240.

MENEZES, C. B.; FERNANDES, E. A.; PARRELA, E. A.; SCHAFFERT, R. R.; RODRIGUES, J. A. S. Importância do sorgo para o abastecimento de grãos, forragem e bioenergia no Brasil. In: MENEZES, C. B. **Melhoramento genético de sorgo**. – Brasília, DF: Embrapa, 2021b. p. 13-58.

SCHNEIDER, S.; CASSOL, A.; LEONARDI, A.; MARINHO, M. de M. Os efeitos da pandemia da Covid-19 sobre o agronegócio e a alimentação. **Estudos Avançados**, [S. l], v. 34, n. 100, p. 167-188, 2020.

SILVA, R. B. **Repetibilidade e seleção em genótipos de *Urochloa* spp.** 2019. 58 p. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) - Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2019.

POSSAMAI, R.; SERIGATI, F. Crise alimentar no mundo. **Agroanalysis**, Fundação Getúlio Vargas, v. 42, n. 06, p. 15-16, 2022.

CAPÍTULO 1. ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE GENÓTIPOS DE SORGO VISANDO A PRODUÇÃO DE BIOMASSA PELO MÉTODO REML/BLUP E GGE BIPILOT

RESUMO

Existem diversas metodologias disponíveis para analisar a interação GxE e a escolha dependerá de uma série de fatores. Os métodos GGE Biplot e REML/BLUP vem sendo utilizados conjuntamente para investigar a interação em várias culturas anuais, entretanto não há relatos para sorgo. Diante disso, objetiva-se avaliar a adaptabilidade e estabilidade de genótipos de sorgo visando a produção de biomassa em Balsas-MA pelo método REML/BLUP e GGE biplot. Os ensaios foram conduzidos em Balsas – MA na segunda safra de 2021 e de 2022, dispostos em blocos casualizados com três repetições e seis tratamentos, sendo eles as cultivares: IPA Sudan 4202, AGRI 001-E, AGRI 002-E, BRS 658, BRS 810 e BRS Ponta Negra. Foram avaliadas a produção de matéria verde e matéria seca em $t\ ha^{-1}$. A significância do modelo foi estimada pela análise de deviance. As estimativas dos componentes de variância foram determinadas pelo procedimento *Restricted Maximum Likelihood* (REML) e adaptabilidade e estabilidade dos genótipos foram determinadas pelo procedimento *Best Linear Unbiased Prediction* (BLUP) sob médias harmônicas e pelas técnicas de GGE biplot. Para análise sob médias harmônicas foi utilizado o programa SELEGEN REML/BLUP. Para análise GGE biplot foi utilizado o software estatístico R. Por meio da avaliação simultânea de produtividade, estabilidade e adaptabilidade (MHPRVG) os genótipos BRS Ponta Negra e AGRI 002-E se mantiverem entre as primeiras posições no ordenamento demonstrando maior adaptabilidade, estabilidade e produtividade. Por meio do GGE biplot foi possível identificar quatro genótipos com desempenho acima da média dos ambientes, sendo eles G6 (BRS Ponta Negra), G3 (AGRI 002-E) e G2 (AGRI 001-E), sendo que G2 teve alta instabilidade. Desta forma, para as condições ambientais de Balsas-MA e considerando-se ambas metodologias em estudo a cultivar BRS Ponta negra demonstrou ser a cultivar com maior potencial para recomendação, seguida das cultivares AGRI 002-E.

Palavras-chave: Interação GxE, médias harmônicas, recomendação, *Sorghum* spp.

ABSTRACT

There are several methodologies available to analyze the GxE interaction and the choice will depend of several factors. The GGE Biplot and REML/BLUP methods have been used together to investigate the interaction in several annual crops, however there are no reports for sorghum. In view of this, the objective is to evaluate the adaptability and stability of sorghum genotypes aiming at biomass production in Balsas-MA by the REML/BLUP method and GGE biplot. The trials were conducted in Balsas - MA in the second harvest of 2021 and 2022, arranged in DBC with three replications and ten treatments, with the following cultivars: Sudan 4202, AGRI 001-E, AGRI 002-E, BRS 658, BRS 810, BRS Ponta Negra. The production of green matter and dry matter in t ha⁻¹ were evaluated. Model significance was estimated by deviance analysis. The estimates of variance components were determined by the REML (Restricted Maximum Likelihood) procedure and adaptability and stability of genotypes were determined by the BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) procedure under harmonic means and by biplot GGE techniques. For analysis under harmonic means, the SELEGEN REML/BLUP program was used. For the GGE biplot analysis, the R statistical software was used. Through the simultaneous evaluation of productivity, stability and adaptability (MHPRVG), the genotypes BRS Ponta Negra and AGRI 002-E remained among the first positions in the ranking, demonstrating increased adaptability, stability and productivity. Through the GGE biplot it was possible to identify four genotypes with performance above the average of the environments, namely G6 (BRS Ponta Negra), G3 (AGRI 002-E) and G2 (AGRI 001-E), however, G2 had high instability. Thus, for the environmental conditions of Balsas-MA and considering both methodologies under study, the BRS Ponta Negra cultivar proved to be the cultivar with the greatest potential for recommendation, followed by the AGRI 002-E cultivars.

Keywords: GxE interaction, harmonic means, recommendation, *Sorghum* spp.

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado é uma das regiões em que a agricultura brasileira mais se desenvolveu nas últimas décadas, com destaque para o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.), que apenas na safra 21/22, em relação à safra anterior, teve um aumento de 36,9% na produção e de 19,4% na área (CONAB, 2022). Tendo-se ainda a expectativa de aumento de produtividade (3,8%) e de produção (4%) de sorgo no Cerrado Maranhense para a safra de 22/23.

Apesar da expectativa de crescimento, existe alguns desafios à expansão do cultivo do sorgo no Cerrado Sul Maranhense, dentre eles cita-se a quantidade limitada de estudos com genótipos de sorgo para a região e a pouca familiaridade dos agricultores. Sendo necessário estudos da interação genótipo x ambiente e mais especificamente a avaliação da adaptabilidade e estabilidade dos genótipos para as condições edafoclimáticas da região.

Existem diversas metodologias estatísticas específicas para a determinação da adaptabilidade e da estabilidade, a primeira data de 1938, denominada de método tradicional sendo baseada na análise de variância que junto com análise de regressão foram durante muito tempo as principais abordagens para análise e modelagem estatística. Porém, estas técnicas tem limitações para lidar com dados desbalanceados e com parentesco entre tratamentos, por isso nos últimos anos diversos pesquisadores tem utilizado a técnica de modelos mistos no melhoramento genético de culturas anuais (RESENDE, 2007).

O método *Restricted Maximum Likelihood* (REML), que é uma generalização da análise de variância para situações mais complexas, permite maior flexibilidade e eficiência na modelagem, apresentando como principais vantagens comparar indivíduos ou variedades por meio do tempo (gerações, anos) e espaço (locais, blocos), estimar componentes de variância e prever valores genéticos; permite lidar com estruturas complexas de dados (medidas repetidas, diferentes anos, locais e delineamentos); pode ser aplicado a dados desbalanceados e a delineamentos não ortogonais; permite utilizar simultaneamente um grande número de informações (RESENDE, 2007).

A Média Harmônica da Performance Relativa dos Valores Genotípicos (MHPRVG) foi preconizada por Resende (2004), um modelo alternativo com base em modelo misto (*Restricted Maximum Likelihood/Best Linear Unbiased Prediction-REML/BLUP*), que avalia simultaneamente, a adaptabilidade, a estabilidade e a

produtividade na mesma escala do caráter avaliado (BORGES *et al.*, 2010; TORRES FILHO *et al.*, 2017). Andrade *et al.* (2016) utilizaram a MHPRVG para avaliar a produtividade, adaptabilidade e estabilidade genotípica de sorgo granífero em 3 ambientes e constataram alta correlação deste método com outros muito utilizados para estudos com sorgo.

Outras técnicas de análise de adaptabilidade e estabilidade que vem ganhando relevância e já vem sendo utilizada para estimar os parâmetros de adaptabilidade e estabilidade de sorgo são os modelos estatísticos multiplicativos para interação, os quais são muito úteis para estudar padrões de desempenho de genótipos por ambientes (DELGADO *et al.*, 2019).

Dentre estes modelos encontra-se a análise *Genotype by Genotypes by Environments Interaction* (GGE biplot) proposto por YAN *et al.* (2000), que considera o efeito principal de genótipo mais a interação genótipo e ambiente, baseadas em gráficos biplot, que representam graficamente uma matriz de dados (SILVA e BENIN, 2012).

Existem diversas metodologias disponíveis para analisar a interação GxE e a escolha por uma delas dependerá de uma série de fatores, como número de ambientes e informações desejadas. Dessa forma, a combinação de metodologias aumenta a confiabilidade na escolha dos genótipos e ambos os métodos GGE Biplot e REML/BLUP já vêm sendo utilizados conjuntamente para investigar a interação em outras culturas, como soja (*Glycine max* (L.) Merrill) (NAZATO, 2018), feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) (SANTOS *et al.*, 2016), cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) permitindo analisar a concordância entre as duas metodologias. Entretanto ainda não há relatos da utilização conjunta das metodologias para o sorgo no Maranhão.

Desta forma, o objetivo no trabalho avaliar a adaptabilidade e estabilidade de genótipos de sorgo visando a produção de biomassa em Balsas-MA pelo método REML/BLUP e GGE biplot.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Os ensaios foram conduzidos na unidade de pesquisa agrônômica da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), no município de Balsas – MA, localizado na região sul do estado do Maranhão, latitude 7° 31' 59" S e longitude 46° 2' 6" W) (Figura 1).

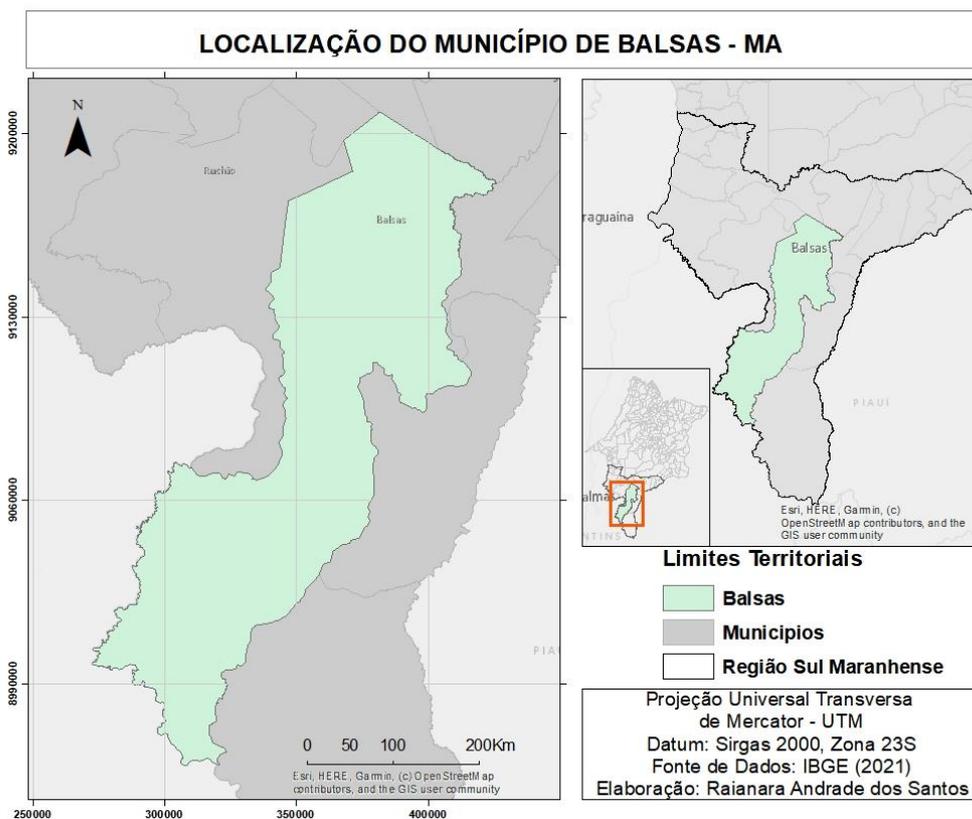


Figura 1 - Área de estudo localizada no município de Balsas, Maranhão.

Balsas apresenta um clima do tipo tropical quente e úmido (Aw) e temperatura média de 27.1 °C, de acordo com a classificação de Köppen e Geiger. A precipitação pluviométrica média anual é de 1175 mm, sendo que as maiores precipitações ocorrem nos meses de novembro a abril, quando concentram 85% do total nesse período (PASSOS, ZAMBRZYCKI e PEREIRA, 2017). Os dados meteorológicos de temperatura e precipitação durante os meses em que os ensaios estavam no campo podem ser observados na Figura 2.

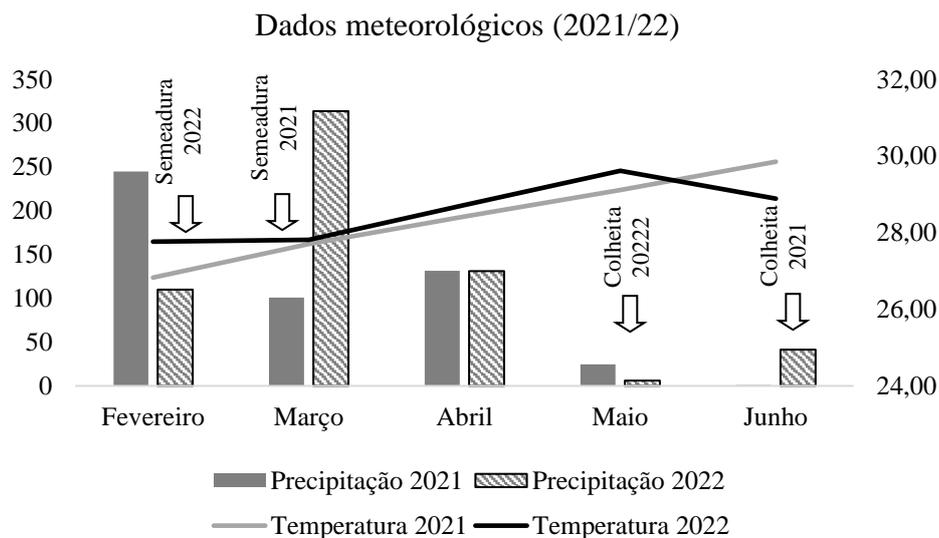


Figura 2 - Dados de temperatura média (°C) e precipitação pluvial (mm) durante os meses de execução do experimento em Balsas no ano de 2021 e 2022 (INMET, 2022).

A amostragem de solo foi realizada na profundidade de 0 a 0,20 m e as características químicas estão na Tabela 1. Os resultados foram utilizados para a recomendação de calagem e adubação segundo Borém *et al.* (2014).

Tabela 1 - Atributos químicos do solo da área experimental.

pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC total	V
em CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³	-----cmol/dm ³ -----							%
3,70	9,92	2,70	0,07	0,51	0,03	0,56	3,64	0,61	4,25	14,30

Foi aplicado na área 480 kg calcário dolomítico PRNT=88%. Para adubação de plantio foi aplicado o formulado NPK (5-25-15), dose 30 kg/ha de N, 60 kg/ha de P₂O₅ e 50 de K₂O. Para controle da vegetação espontânea foi aplicado em pré-emergência o herbicida atrazina. A adubação de cobertura com N foi realizada quando as plantas atingiram 30 cm.

2.2 Delineamento experimental

As cultivares de sorgo foram cultivados na segunda safra de 2021 e de 2022, os ensaios foram dispostos em delineamento experimental de blocos casualizados com três repetições e seis tratamentos (Tabela 2), que correspondem a seis cultivares de sorgo forrageiro.

Tabela 2 - Código, espécies, aptidão agrônômica e mantenedor das cultivares avaliadas.

Código	Cultivar	Nome científico	Densidade	Mantenedor
G1	SUDAN 4202	<i>Sorghum sudanense</i> (Piper) Stapf	12	IPA
G2	AGRI 001-E	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	8	TROPIGENE
G3	AGRI 002-E	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	8	TROPIGENE
G4	BRS 658	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	10	EMBRAPA
G5	BRS 810	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench x <i>Sorghum sudanense</i> (Piper) Stapf	10	EMBRAPA
G6	Ponta negra	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	12	EMBRAPA/EMPA RN

Cada parcela experimental foi constituída por cinco linhas de 5 metros de comprimento cada, espaçadas de 0,80 metros. As duas linhas laterais serviram de bordadura e as 3 centrais foram consideradas como área útil de avaliação, desconsiderando-se 0,5 m em cada extremidade destas linhas centrais, totalizando 9,6 m² de área útil.

A semeadura foi realizada manualmente, distribuindo-se cerca de vinte sementes por metro. O desbaste ocorreu quando as plantas atingiram o estágio de três folhas totalmente desenvolvidas.

Todos os tratamentos culturais seguiram as recomendações técnicas para a cultura do sorgo, apresentadas por Borém *et al.* (2014).

Em cada experimento foram mensuradas as seguintes variáveis:

- a) **Produção de matéria verde (PMV), em t ha⁻¹:** as plantas da área útil foram colhidas, identificadas e levadas ao laboratório para pesagem da matéria fresca de cada tratamento.
- b) **Produção de matéria seca (PMS), em t ha⁻¹:** uma amostra aleatória de plantas de cada parcela foi colhida, pesadas e separadas 500 g de cada parte da planta (folhas, colmo e panículas). Em seguida, foram colocadas em sacos de papel, identificadas, e levadas à estufa a 65°C por 72 horas ou até apresentar peso constante.

2.3 Análises de adaptabilidade e estabilidade

2.3.1 REML/BLUP

As estimativas dos componentes de variância foram determinadas pelo procedimento REML (*Restricted Maximum Likelihood*) e adaptabilidade e estabilidade dos genótipos foram determinadas pelo procedimento BLUP (*Best Linear Unbiased Prediction*) sob médias harmônicas e pelas técnicas de GGE biplot.

A média harmônica dos valores genotípicos (MHVG), a performance relativa dos valores genotípicos (PRVG), bem como da produtividade, estabilidade e adaptabilidade conjuntamente, baseadas na média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG) preditos, foi obtida de acordo com metodologia descrita por Resende (2004), utilizando a Equação 1.

$$Y = Xr + Zg + Wp + Ti + \varepsilon \quad (1)$$

Em que, y = vetor de dados, r = vetor dos efeitos das combinações repetição-ambiente adicionado à média geral, g = vetor dos efeitos genotípicos, p = vetor dos efeitos de parcela, i = vetor dos efeitos da interação genótipos x ambientes e ε = vetor de erros ou resíduos. As letras maiúsculas representam as matrizes de incidência para os referidos efeitos.

Para análise foi utilizado o programa Selegen REML/BLUP (RESENDE, 2007), modelo 55, que representa dados de experimentos em delineamento de blocos completos avaliados em um só local e em várias colheitas com interação genótipos x ambientes para estudos de estabilidade e adaptabilidade – Método MHPRVG.

A significância do modelo foi estimada pela análise de deviance. As deviances foram obtidas por meio de análises com e sem os efeitos do genótipo, ambiente e genótipos x ambientes. Em seguida, subtraiu-se de cada deviance do modelo completo a deviance sem o referido efeito, confrontando-a com o valor do qui-quadrado com um grau de liberdade a 5% de probabilidade. Conforme recomendações de Resende (2007).

Os valores genotípicos de estabilidade foram obtidos utilizando a média harmônica dos valores genotípicos (MHVG) de acordo com a equação (2). Para adaptabilidade, foi empregada a performance relativa dos valores genotípicos (PRVG), equação (3). E para avaliar simultaneamente a estabilidade, adaptabilidade e produtividade foi empregada a média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG), equação (4):

$$MHVG_i = \frac{1}{\sum_i^1 \frac{1}{VG_j}} \quad (2)$$

$$PRVG = \frac{1}{I} \left(\frac{\sum VG_i}{M_i} \right) \quad (3)$$

$$MHPRVG_i = \frac{1}{\sum_i^1 \frac{1}{PRVG_{ij}}} \quad (4)$$

em que:

I: número de locais;

VG: valor genotípico;

i: genótipos;

VG_{ij} : valor genotípico da cultivar i no ambiente j e VG_j corresponde à média genotípica no ambiente j.

Os Componentes de Variância (REML Individual):

Vg: variância genotípica;

Vperm: variância de ambiente permanente;

Vgm: variância da interação genótipos x ambientes;

Ve: variância residual;

Vf: variância fenotípica individual;

$h2g = h2$: herdabilidade de parcelas individuais no sentido amplo, ou seja, dos efeitos genotípicos totais.

r: repetibilidade ao nível de parcela, dada por $(Vg + Vperm)/Vf$.

$c2perm = c2$: coeficiente de determinação dos efeitos de ambiente permanente.

$c2gm = c21$: coeficiente de determinação dos efeitos da interação genótipos x ambientes; rgmed: correlação genotípica através das medições.

$h2mg$: herdabilidade da média de genótipos.

Média geral do experimento.

Além destes parâmetros, foi determinado o coeficiente de variação relativa e aplicou-se a fórmula: $CVr = \frac{CV_g\%}{CV_e\%}$; sendo $CV_g\%$ o coeficiente de variação genotípica e $CV_e\%$: coeficiente de variação residual (RESENDE e DUARTE, 2007).

2.3.2 GGE Biplot

A análise multivariada GGE biplot foi baseada na informação fenotípica média, considerando o modelo da Equação 4.

$$Y_{ij} = \mu + G_i + E_j + GE_{ij} \quad (4)$$

Em que, Y_{ij} = média fenotípica do genótipo i no ambiente j , μ = constante geral, G_i = efeito do genótipo i , E_j = efeito do ambiente j e GE_{ij} = efeito da interação entre o genótipo i e o ambiente j (YAN *et al.*, 2000).

O modelo GGE biplot não separa o efeito do genótipo (G) do efeito do genótipo x interação do ambiente (GE), mantendo-os juntos em dois termos multiplicativos. Logo, a construção do biplot no modelo GGE é realizado pela dispersão de g_1 e g_2 para genótipos e e_1 e e_2 para ambientes, via decomposição em valores singulares (SVD) (SILVA *et al.*, 2021).

Para análise multivariada GGE biplot foi utilizado o pacote *Multi-Environment Trial Analysis* (metan) (OLIVOTO E LUCIO, 2020) do software estatístico R, versão 4.1.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2021).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANADEV e Componentes de variância (REML)

A análise de deviance referente ao efeito da interação genótipos x anos foi significativa apenas para produção de matéria seca (PMS), via Teste da Razão de Verossimilhança pelo teste de qui-quadrado ao nível de 5% (Tabela 3).

Esse resultado indica que o comportamento das cultivares é variável entre as safras a serem consideradas, demonstrando a necessidade de estudos de adaptabilidade e estabilidade para a cultura do sorgo em Balsas-MA.

Tabela 3 - Análise de deviance (ANADEV) e significância pelo Teste da Razão de Verossimilhança (LRT) para os efeitos de genótipos e interações dos genótipos de sorgo avaliados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA.

ANADEV		Efeito		
		Completo	Genótipos	Genótipos*Anos
PMV	Deviance	153,76	155,63	157,22
	LRT (x^2)		1,87	3,46
PMS	Deviance	93,94	96,25	102,79
	LRT (x^2)		2,31	8,85 **

** Significativo pelo teste qui-quadrado com 1 grau de liberdade a 5% (3,84).

Para avaliar a precisão dos experimentos, GURGEL *et al.* (2013) recomendam o uso do coeficiente de variação (CVe%) para assegurar a recomendação do melhor material dentre os avaliados. Para ser considerada precisa a recomendação de cultivares, o coeficiente de variação experimental (CVe%) deve ser inferior ou igual a 20%, sendo este critério aplicado para as culturas de soja, trigo, feijão, milho e sorgo (BRASIL, 2022).

Logo, o CVe% encontrado neste estudo está dentro do limite, 20,7% para PMS, respectivamente (Tabela 4). Valores semelhantes a estes foram encontrados por Silva *et al.* (2022) para produtividade de grãos de sorgo (CVe%= 20,11).

Tabela 4 - Coeficientes de variação genotípica (CVg%) e experimental (CVe%) e coeficiente de variação da relativa (CVr) dos genótipos testados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA para produção de matéria seca (PMS).

Efeitos	PMS
CVg%	19,18
CVe%	20,7
CVr	0,92

Diversos autores também obtiveram valores de coeficientes de variação experimental de genótipos de sorgo dentro do limite aceitável para uma boa precisão

dos ensaios, dentre eles cita-se Cysne e Pitombeira (2012) que encontraram coeficientes de variação de oscilando entre 9 % a 19 %.

Para coeficiente de variação genética (CVg%) foram obtidos resultados iguais a 19,2% para PMS (Tabela 3). Cunha e Lima (2010) obtiveram estimativas iguais a 23,72% para massa seca em ensaios experimentais de sorgo.

O CVg% expressa a magnitude da variação genética em relação à média da variável analisada, indicando a existência da variabilidade genética nos genótipos de sorgo para as características PMS (RESENDE *et al.*, 1991). Logo, quanto maior o valor do CVg, maiores as chances de serem obtidos ganhos genéticos na seleção.

A partir do coeficiente de variação relativa (CVr%), razão do CVg% pelo CVe%, é possível obter a acurácia da avaliação genotípica (RESENDE e DUARTE, 2007). Com um CVr% de 0,92 e 3 repetições, do estudo em questão, afirma-se que os valores genéticos para os caracteres produção de matéria verde e produção de matéria seca foram preditos com alta acurácia, pois resultou em valor de 0,85 de acurácia para ambas variáveis. Cunha e Lima (2010), em ensaios de genótipos de sorgo tiveram resultados de CVr% de 0,87 (PMS), semelhante ao encontrado nesse estudo.

Segundo Resende e Duarte (2007) valores de acurácia entre 0,70 e 0,90 são classificados como de alta precisão. Dessa forma, o delineamento experimental e o número de repetições (3) utilizadas nos experimentos foram adequados na seleção de genótipos de sorgo, que gerou resultados com alta precisão e confiabilidade.

Tabela 5 - Componentes de variância (REML Individual), coeficientes de determinação e coeficientes de variação referentes à análise dos genótipos avaliados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA para produção de matéria seca (PMS).

Efeitos	PMS
Vg	6,85
Vperm	2,35
Vgm	3,61
Ve	1,28
Vf	14,11
h2g	0,48 +- 0,33
r	0,65
c2perm	0,16
c2gm	0,25
rgmed	0,65
h2mg	0,71
Média geral	8,44

Efeitos: V_g : variância genotípica; V_{perm} : variância de ambiente permanente; V_{gm} : variância da interação genótipos x ambientes; V_e : variância residual; V_f : variância fenotípica individual; h_2g : herdabilidade de parcelas individuais no sentido amplo; r : repetibilidade ao nível de parcela; c_{2perm} : coeficiente de determinação dos efeitos de ambiente permanente; c_{2gm} : coeficiente de determinação dos efeitos da interação genótipos x ambientes; rg_{med} : correlação genotípica através das medições; h_{2mg} : herdabilidade da média de genótipos.

Os genótipos de sorgo avaliados em 2021 e 2022 no município de Balsas-MA tiveram médias geral de $8,44 \text{ t ha}^{-1}$ para produção de matéria seca.

A herdabilidade é um dos mais importantes parâmetros genéticos, pois quantifica a fração da variação fenotípica de natureza herdável. Ao se estimar a herdabilidade no sentido amplo, considera-se a dispersão genética total (MAIA *et al.*, 2009).

O valor de herdabilidade do presente estudo foi de 0,48 com desvio de 0,33, o que de acordo com Silva *et al.* (2022), são esperados baixos resultados para características de produção, pois são governadas por vários genes com pouco efeito sobre o fenótipo e consideravelmente influenciado pelo meio ambiente.

A correlação genotípica através das medições (rg_{med}), fornece uma medida de quanto constante será o “ranqueamento” dos genótipos, ao longo dos ambientes testados, no caso deste estudo ao longo das safras (MAIA *et al.*, 2009). A rg_{med} teve média magnitude ($PMS=0,65$), indica que o ranqueamento pode se alterar ao longo dos anos, isso pode ser explicado devido à presença de uma interação $G \times A$ de natureza complexa.

Valores semelhantes foram encontrados em outros estudos como de Torres Filho *et al.* (2017), que observaram alterações no ordenamento dos genótipos, em virtude da magnitude da correlação genotípica (0,48) ao longo dos ambientes. Os autores afirmam ainda que isto representa certa dificuldade na seleção de genótipos de adaptação mais ampla. Silva *et al.* (2022), encontraram resultados inferiores (0,21) que também indicam a existência de uma interação $G \times E$ complexa.

3.2 Componentes de Média (BLUP)

A avaliação dos ganhos genéticos foi realizada para a seleção dos melhores genótipos, a partir da comparação entre seus valores genotípico preditos ($u + g$) sem efeito de interação genótipo ambiente e o valor genotípico médio ($u + g + gem$) adicionado à interação média entre ambientes (CASTRO *et al.*, 2018).

O segundo índice (u+g+gem), considera uma interação média entre os ambientes estudados, sendo, portanto, utilizado para recomendação de forma generalizada (CASTRO *et al.*, 2018).

O ganho genético representa superioridade genética dos descendentes em relação à média da geração dos pais e é diretamente proporcional à acurácia de seleção, à intensidade de seleção e à variação genética existente (CARNEIRO JÚNIOR, 2009).

O genótipo BRS Ponta Negra obteve a melhor classificação com um valor genotípico de 11,80 e ganho de 3,35 para PMS (Tabela 6).

Em sequência a BRS Ponta Negra está a AGRI 002-E, que juntos contabilizam 2,70 de ganho genético em relação à média geral.

Tabela 6 - Estimativas dos efeitos genotípicos (g), valores genotípicos preditos (u + g), ganho genético e valor genotípico médio nos vários ambientes (u + g + gem) para produção de matéria seca avaliados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA.

Ordem	Genótipos	g	u + g	Ganho	Nova Média	u+g+gem
1	BRS P NEGRA	3,35	11,80	3,35	11,80	12,68
2	AGRI 002-E	2,05	10,49	2,70	11,14	11,03
3	AGRI 001-E	-0,55	7,89	1,62	10,06	7,75
4	IPA SUDAN 4202	-0,91	7,54	0,99	9,43	7,30
5	BRS 658	-1,97	6,47	0,39	8,84	5,95
6	BRS 810	-1,97	6,47	0,00	8,44	5,95

As cultivares BRS 658 e BRS 810 apresentaram valores genótipos inferiores em relação as demais com ganho genético quase nulo em relação à média geral.

3.3 Estimativas de MHVG, PRVG e MHPRVG

A MHVG penaliza a instabilidade, assim os resultados trazem novas médias já ajustadas após essa penalização, médias estas que estão na mesma escala do caráter avaliado, no caso PMS.

Tabela 7 - Estimativas de MHVG e PRVG para os genótipos de sorgo nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA quanto a PMS.

----- Estabilidade -----			----- Adaptabilidade -----			
Ordem	Genótipo	MHVG	Ordem	Genótipo	PRVG	PRVG*MG
1	BRS P NEGRA	11,62	1	BRS P NEGRA	1,49	12,57
2	AGRI 002-E	9,72	2	AGRI 002-E	1,28	10,77
3	AGRI 001-E	7,66	3	AGRI 001-E	0,96	8,07
4	IPA SUDAN 4202	6,82	4	IPA SUDAN 4202	0,86	7,30
5	BRS 658	5,74	5	BRS 658	0,72	6,06
6	BRS 810	5,46	6	BRS 810	0,70	5,90

Segundo o ranqueamento para estabilidade (MHPR) e adaptabilidade (PRVG) as cultivares mais estáveis e adaptadas foram, em ordem decrescente, BRS P NEGRA, AGRI 002-E, AGRI 001-E, IPA SUDAN 4202, BRS 658 e BRS 810.

Para selecionar os genótipos com base na produtividade, adaptabilidade e estabilidade deve-se optar por aqueles cujas estimativas da MHPRVG seja igual ou superior a 1 (RESENDE, 2004). Dessa maneira, quatro cultivares se enquadram nessa condição sendo eles a BRS Ponta Negra e AGRI 002-E, no ranqueamento da MHPRVG*MG (Tabela 8) para produção de matéria seca.

Tabela 8 - Estimativas de MHPRVG para os genótipos de sorgo avaliados nas safras 2021 e 2022 em Balsas-MA quanto a PMS.

Estabilidade e Adaptabilidade			
Ordem	Genótipo	MHPRVG	MHPRVG*MG
1	BRS P NEGRA	1,49	12,55
2	AGRI 002-E	1,26	10,67
3	AGRI 001-E	0,93	7,87
4	IPA SUDAN 4202	0,86	7,30
5	BRS 658	0,71	6,03
6	BRS 810	0,70	5,89

As duas safras (2021 e 2022) tiveram precipitações acumuladas diferentes no período dos experimentos. E mesmo com a menor precipitação em 2021 (Figura 2) a BRS Ponta Negra e a AGRI 002-E conseguiram as maiores produções de matéria seca, o que possibilitou às mesmas serem selecionadas simultaneamente para produtividade, estabilidade e adaptabilidade.

Santos *et al.* (2013), ao avaliarem a produtividade de cinco genótipos de sorgo no Vale do São Francisco encontraram resultados que demonstraram que a BRS Ponta Negra apresentou uma das maiores produtividades de matéria verde.

Em um ensaio Regional do Nordeste organizado pela Embrapa Milho e Sorgo, envolvendo variedades e híbridos de sorgo oriundos da Embrapa, IPA e empresas da iniciativa privada, foi observado que a variedade BRS Ponta Negra apresentou boa performance para produção de forragem, por apresentar maior precocidade e boa proporção de panículas na massa total, em relação às cultivares avaliadas (SANTOS *et al.*, 2007).

Ainda em relação a superioridade da cultivar BRS Ponta Negra, em estudos de restrição hídrica Costa *et al.* (2019) verificou que a redução de 23% da lâmina de irrigação, considerada potencial para a cultura do sorgo, não prejudicou a produtividade total de massa verde da Ponta Negra, que foi explicada devido a cultura apresentar dois mecanismos de resistência a seca, o escape e a tolerância.

Além de ser uma cultivar tolerante à seca, a BRS Ponta Negra ainda possui tolerância à toxicidade por alumínio, à acidez do solo, ao fotoperiodismo e é resistente às principais doenças, principalmente à antracnose (SANTOS, 2007).

A BRS 810 e a BRS 658 foram as últimas ranqueadas para produção de matéria seca, não sendo interessantes na seleção já que apresentaram baixas produtividades. Apesar da cultivar BRS 658 ter aptidão para forragem e apresentar características como tolerância à seca, baixo custo de produção e alta qualidade de forragem, mostrou-se inferior para PMS em Balsas-MA.

3.4 GGE Biplot

O modelo GGE biplot é baseado na análise de componentes principais, o que de acordo com Rencher (2002), para ser considerado adequado para representar os padrões relacionados à interação pelo menos 70% da variância total devem ser explicadas pelo primeiro e o segundo componentes principais.

Na análise de desempenho vs estabilidade, os dois primeiros componentes principais explicam 100% (PC 1 = 94,89 e PC 2 = 5,11%) da variação total da interação genótipo vs ambiente para variável PMS (em t ha⁻¹) (Figura 3).

Como os dois primeiros componentes principais explicaram 100% da variação total dos dados, logo, o GGE biplot explicou a variância amostral total e pode ser utilizado com confiança para o estudo dos dados. Delgado *et al.* (2019), em estudo de massa seca para genótipos de sorgo em diversos ambientes também observou uma contribuição dos dois componentes acima de 70% para explicar variação nos dados.

No biplot da figura 3 é possível observar como os genótipos estão posicionados em ordem quanto a adaptabilidade e estabilidade, pois na figura, uma linha reta foi traçada com uma seta, passando pela origem do biplot, apontada para os genótipos de maior produção.

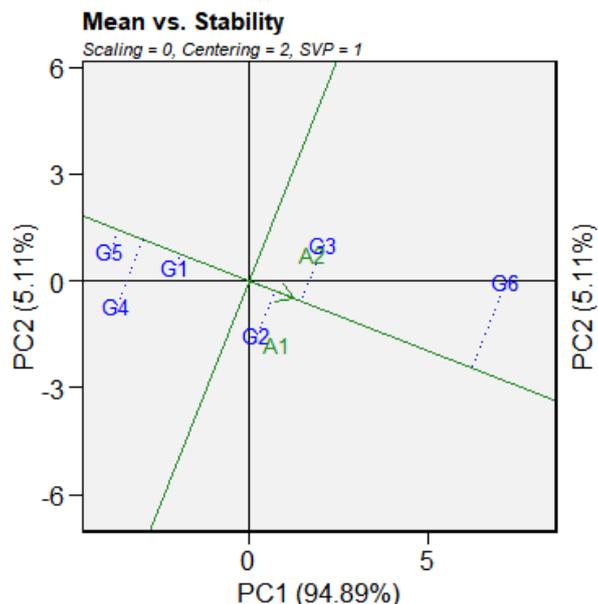


Figura 3 - Desempenho médio vs. estabilidade dos genótipos de sorgo (G1- IPA SUDAN 4202, G2- AGRI 001-E, G3- AGRI 002-E, G4- BRS 658, G5- BRS 810, G6- BRS P NEGRA) para produção de matéria seca nas safras 2021 (A1) e 2022 (A2).

O primeiro componente principal (PC1) indica a adaptabilidade dos genótipos que está relacionada com a capacidade produtiva, enquanto o segundo componente principal (PC2) indica a estabilidade, os genótipos com PC2 menores ou mais próximos de zero são mais estáveis (BATISTA *et al.*, 2017).

Logo, ao analisar o biplot é possível perceber que o genótipo G6 (BRS Ponta Negra), G3 (AGRI 002-E) e G2 (AGRI 001-E) foram os que apresentaram médias acima da média geral, para a variável PMS (Figura 5).

Os genótipos G1 (IPA SUDAN 4202), G4 (BRS 658), G5 (BRS 810) apresentaram os menores desempenhos dentre os genótipos avaliados no município de Balsas.

A média geral de PMS foi superior no ambiente 2 (safra 2022) em comparação ao ambiente 1 (safra 2021) (Figura 4). Fato esse que pode ser explicado pela maior quantidade de chuvas no intervalo de dias do experimento na safra 2022 (Figura 2) se comparada a safra 2021.

A alta estabilidade associada a um alto desempenho produtivo é essencial para a recomendação de uma cultivar, principalmente para ambientes ou estações com alta instabilidade pluviométrica, como no cultivo de sorgo de segunda safra no Brasil (BATISTA *et al.*, 2017).

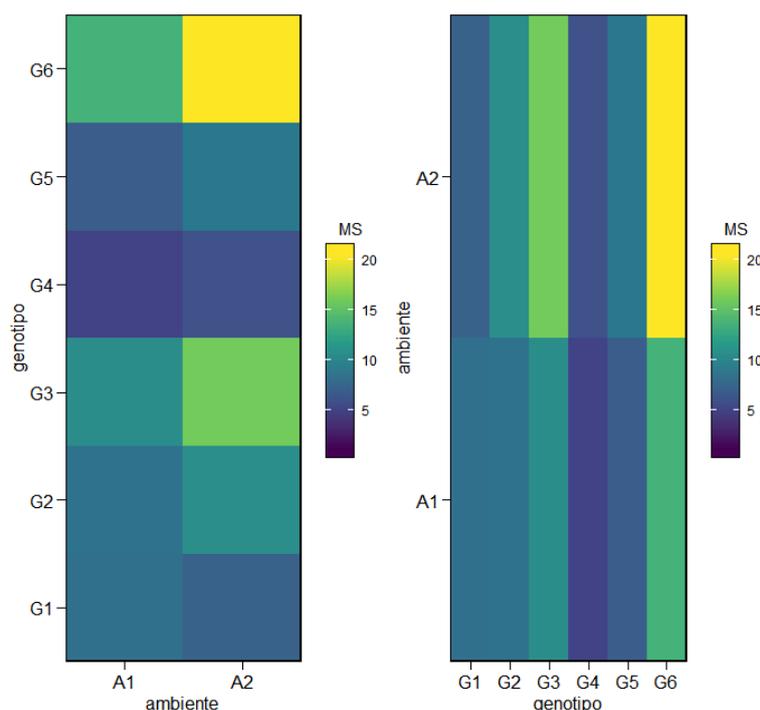


Figura 4 - Desempenho dos genótipos quanto a PMV e PMS através dos ambientes.

Comparado ao MHPRVG, o modelo GGE explora com mais eficácia a interação genótipo e ambiente, possibilita à identificação de mega-ambientes e a seleção de genótipos estáveis e adaptados a ambientes específicos e a mega-ambientes (SILVA e BENIN, 2012).

Ambos as metodologias estudadas obtiveram ordenamento semelhantes para as cultivares superiores, corroborando com Santos *et al.* (2016) que ao avaliar a adaptabilidade e estabilidade de genótipos de feijão caupi também via REML/BLUP e GGE Biplot verificou concordância entre os métodos na identificação dos genótipos superiores.

Conforme Nazato (2018), que analisou cultivares de soja pelos métodos de MHPRVG e GGE Biplot, apesar de ambas metodologias recomendarem praticamente os mesmos genótipos com base na adaptabilidade, estabilidade e produtividade das características avaliadas, elas são complementares, pois por meio do GGE Biplot o conjunto de ambientes é melhor explorado e pela metodologia MHPRVG o ordenamento dos genótipos é mais simples permitindo a seleção direta.

Considerando-se a avaliação simultânea de produtividade, estabilidade e adaptabilidade (MHPRVG) os genótipos BRS Ponta Negra e AGRI 002-E são os mais

indicados ao cultivo visando produção de biomassa com base no procedimento dos modelos mistos.

4. CONCLUSÃO

Embora se tratem de metodologias diferentes, ambas trouxeram resultados semelhantes. Logo, para as condições edafoclimáticas de Balsas-MA e considerando-se as metodologias em estudo, REML/BLUP e GGE biplot, a cultivar BRS Ponta negra demonstrou ser a cultivar com maior potencial para recomendação, seguida da cultivar AGRI 002-E, sendo estes os materiais com elevada adaptabilidade, estabilidade e produtividade de biomassa.

Os resultados da interação dos genótipos de sorgo nas duas safras avaliadas no município de Balsas-MA são de suma importância tanto para produtores quanto para os melhoristas na identificação do melhor genótipo para o ambiente, o que demanda tempo e dinheiro no programa de melhoramento, possibilitando o desenvolvimento de cultivares melhoradas.

Além disso, os resultados alcançados servirão de base para trabalhos futuros e para formulação de novas hipóteses. A interação genótipo x ambiente das cultivares de sorgo também poderia ser investigada em outros municípios da região sul maranhense permitindo o levantamento da cultivar mais adaptada e estável nas condições edafoclimáticas do Cerrado Sul maranhense.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, L. C.; MENEZES, C. B.; SILVA, K. J.; SANTOS, C. V.; EMYGDIO, B. M.; TARDIN, F. D. Avaliação de produtividade, adaptabilidade e estabilidade genotípica de sorgo granífero em três ambientes. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 37, n. 1, p. 36-43, 2016.
- BATISTA, P. S. C.; MENEZES, C. B.; CARVALHO, A. J.; PORTUGAL, A. F.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; SANTOS, C. V.; JULIO, M. P. M. Performance of grain sorghum hybrids under drought stress using GGE biplot analyses. **Genetics and Molecular Research**, v.16, n.3, p.1-12, 2017.
- BORGES, V.; SOARES, A. A; REIS, M. S.; RESENDE, M.D.V.; CORNÉLIO, V. M. O.; LEITE, N. A.; VIEIRA, A. R. Desempenho genotípico de linhagens de arroz de terras altas utilizando metodologia de modelos mistos. **Melhoramento genético vegetal**, Bragantina, v. 64, n. 4, 2010.
- BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. **Sorgo: do plantio à colheita**. Editora UFV, 2014. 275 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Requisitos Mínimos para Determinação do Valor de Cultivo e Uso de Sorgo (*Sorghum* spp) para Inscrição no Registro Nacional de Cultivares - RNC**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/sementes-e-mudas/registro-nacional-de-cultivares-2013-rnc-1/valor-de-cultivo-e-uso-2013-vcu>>. Acesso em: 05 out. 2022.
- CARNEIRO JÚNIOR, J. M. Capítulo 11: Melhoramento genético animal. In: GONÇALVES, R. C.; OLIVEIRA, L. C. **Embrapa Acre: ciência e tecnologia para o desenvolvimento sustentável do sudoeste da Amazônia**. – Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2009. 444 p.
- CASTRO, C. S. O.; NUNES, A. C. P.; SANTOS, O. P.; RESENDE, R. T.; SANTOS, G. A.; RESENDE, M. D. V.; CRUZ, C. D. Comportamento da interação genótipos por locais aos três e nove anos em clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 120, p. 594-605, 2018.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2022/23 - primeiro levantamento. Brasília – DF: **Conab**, v. 10, n. 1, outubro 2022.
- COSTA, A. R. F. C.; COSTA, J. P. N.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, M. V. T.; LINO, V. A. S. Desempenho de variedades de sorgo dupla aptidão submetidas a diferentes lâminas de irrigação com água salina. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.18, n.3, p. 417-428, 2019.
- CUNHA, E. E.; LIMA, J. M. P. Caracterização de genótipos e estimativa de parâmetros genéticos de características produtivas de sorgo forrageiro. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, n.4, p.701-706, 2010.

CYSNE, J. R. B.; PITOMBEIRA, J. B. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de sorgo granífero em diferentes ambientes do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.2, p.273-278, 2012.

DELGADO, I. D.; GONÇALVES, F. M. A.; PARRELA, R. A. C.; CASTRO, F. M. R.; NUNES, J. A. R. Genotype by environment interaction and adaptability of photoperiod-sensitive biomass sorghum hybrids. **Plant Breeding**, Bragantia, Campinas, v. 78, n. 4, p.509-521, 2019.

GURGEL, F. L.; FERREIRA, F. D.; SOARES, A. C. S. O coeficiente de variação como critério de avaliação em experimentos de milho e feijão. – Belém, PA: **Embrapa Amazônia Oriental**, 2013.

MAIA, M. C. C., RESENDE, M. D. V., PAIVA, J. R., CAVALCANTI, J. J. V., & BARROS, L. M. Seleção simultânea para produção, adaptabilidade e estabilidade genotípicas em clones de cajueiro, via modelos mistos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 39, 43-50, 2009.

NAZATO, F. M. **Adaptabilidade e estabilidade de linhagens experimentais de soja convencional e transgênica com ênfase em produtividade e tolerância à ferrugem**, 2018. 179 p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) -Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2018.

OLIVOTO, T.; LÚCIO, A. D. (2020). metan: an R package for multi-environment trial analysis. **Methods Ecology Evolution**. 11:783-789. doi:10.1111/2041-210X.13384.

PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas - MA. **Revista Scientia Agraria**, v.18, n.1, p.83-89, 2017.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

RESENDE, M. D. V.; SOUZA, S. M.; HIGA, A. R.; STEIN, P. P. Estudos da variação genética e métodos de seleção em teste de progênies de *Acacia mearnsii* no Rio Grande do Sul. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 22/23, p.45-59, 1991.

RESENDE, M. D. V. de; DUARTE, J.B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, p.182-194, 2007.

RESENDE, M. D. V. **Software SELEGEN- REML/BLUP**: Sistema estatístico e seleção computadorizada via modelos lineares mistos. Embrapa, Colombo, 2007. 359p.

RESENDE, M. D. V. **Métodos estatísticos ótimos na análise de experimentos de campo**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 57 p.

SANTOS, F. G.; RODRIGUES, J. A. S.; SCHAFFERT, R. E.; LIMA, J. M. P.; PITTA, G. V. E.; CASELA, C. R.; FERREIRA, A. S. Comunicado técnico 145: **BRS Ponta**

Negra Variedade de Sorgo Forrageiro. Embrapa milho e sorgo, Sete Lagoas, MG Setembro, 2007.

SANTOS, R. D.; PEREIRA, L. G. R.; NEVES, A. L. A.; RODRIGUES, A. S.; COSTA, C. T. F.; OLIVEIRA, G. F. Agronomic characteristics of forage sorghum cultivars for silage production in the lower middle San Francisco Valley. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 35, n. 1, p. 13-19, 2013.

SANTOS, A.; CECCON, G.; TEODORO, P. E.; CORREA, A. M. ALVAREZ, R. C. F.; SILVA, J. F.; ALVES, V. B. A. Adaptability and stability of erect cowpea genotypes via REML/BLUP and GGE Biplot. **Melhoramento genético vegetal**, Bragantia, Campinas, v. 75, n. 3, p. 299-306, 2016.

SILVA, K. E. F.; VALE, J. C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; MARQUES, J. N. GGE biplot projection in adaptability and stability inference of soybean in an agricultural center Paraná, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 1, e20207131, 2021.

SILVA, K. J.; MENEZES, C. B.; TEODORO, L. P. R.; SANTOS, C. V.; CAMPOS, A. F.; CARVALHO, A. J.; BARBOSA, E. S. Multi-environmental evaluation of sorghum hybrids during off-season in Brazil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.57, e02628, 2022.

SILVA, R. R.; BENIN, G. Análises Biplot: conceitos, interpretações e aplicações. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.8, 2012.

TORRES FILHO, J.; OLIVEIRA, C. N. G. S.; SILVEIRA, L. M.; NUNES, G. H. S.; SILVA, A. J. R.; SILVA, M. F. N. Genotype by environment interaction in green cowpea analyzed via mixed models. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 3, p. 687–697, 2017.

YAN, W., HUNT, L.A., SHENG, Q., AND SZLAVNICS, Z. Cultivar Evaluation and Mega-Environment Investigation Based on the GGE Biplot. **Crop Science**, v. 40, n.3, p. 597-605, 2000.

CAPÍTULO 2. REPETIBILIDADE E NÚMERO DE REPETIÇÕES EM GENÓTIPOS DE SORGO EM BALSAS-MA

RESUMO

No melhoramento genético a etapa da experimentação é de grande relevância no processo de recomendação de cultivares, todavia é preciso determinar quantas repetições são necessárias para que a seleção entre os genótipos seja feita com eficiência. Desta forma, buscou-se estimar os coeficientes de repetibilidade e o número de avaliações necessárias para se obter coeficiente de determinação igual a 90% em variáveis de genótipos de sorgo em Balsas-MA. Os ensaios foram conduzidos em Balsas – MA na segunda safra de 2021 e de 2022, dispostos em DBC com três repetições e dez tratamentos: Sudan 4202, AGRI 001-E, AGRI 002-E, BRS 658, BRS 810, BRS Ponta Negra, BRS 373, BR 509, BR 506 e IPA 467-4-2. Foram avaliadas a altura das plantas, diâmetro do colmo, número de folhas, área foliar, dias para florescimento, ciclo total, produção de matéria verde, produção de matéria seca, índice relativo de clorofila e Brix. Os dados foram submetidos a análise de variância individual. Os coeficientes de repetibilidade (r) e número mínimo de repetições (η_0) para prever o valor real dos genótipos para cada variável, foram estimados pelos métodos da análise de variância; análise dos componentes principais com base nas matrizes de correlações e com base na matriz de variâncias e covariâncias e análise estrutural com base nas matrizes de correlações e matrizes de covariâncias, pelo programa GENES. Foram observados valores elevados para coeficiente de determinação (R^2), superiores a 78.54%, evidenciando elevada precisão na predição do valor real de indivíduos a partir das três repetições. Todavia, para uma precisão de 90% algumas variáveis como produção de matéria seca, índice relativo de clorofila e área foliar necessitariam de mais repetições. Os ensaios experimentais de sorgo, para cultivares estudadas, com três repetições são capazes de identificar genótipos superiores, em relação as variáveis altura, diâmetro do colmo, dias para florescimento e ciclo total, com uma exatidão superior a 90% na predição de seu valor real. Para alcançar a mesma precisão as variáveis produção de matéria seca e índice relativo de clorofila necessitariam de cinco repetições, área foliar seis repetições.

Palavras-chave: Precisão, acurácia, medições.

ABSTRACT

In genetic improvement, the experimentation stage is of great importance in the process of recommending cultivars, however it is necessary to determine how many repetitions are necessary for the selection between genotypes to be done efficiently. Thus, we sought to estimate the repeatability coefficients and the number of evaluations necessary to obtain a determination coefficient equal to 90% in variables of sorghum genotypes in Balsas-MA. The trials were conducted in Balsas - MA in the second harvest of 2021 and 2022, arranged in DBC with three replications and ten treatments: Sudan 4202, AGRI 001-E, AGRI 002-E, BRS 658, BRS 810, BRS Ponta Negra, BRS 373, BR 509, BR 506 e IPA 467-4-2. Plant height, stem diameter, number of leaves, leaf area, days to flowering, total cycle, green matter production, dry matter production, relative index of chlorophyll and Brix were evaluated. Data were subjected to individual analysis of variance. The repeatability coefficients (r) and minimum number of repetitions (η_O) to predict the real value of the genotypes for each variable were estimated by the methods of analysis of variance; analysis of principal components based on the correlation matrices and based on the variance and covariance matrix and structural analysis based on the correlation matrices and covariance matrices, using the GENES program. High values were observed for the coefficient of determination (R^2), greater than 78.54%, evidencing precision in the prediction of the real value of individuals from the three repetitions. However, for a precision of 90% some variables such as dry matter production, relative chlorophyll index and leaf area would require more repetitions. Experimental trials of sorghum, for the studied cultivars, with three replications are capable of identifying superior genotypes, in relation to the variables height, stem diameter, days to flowering and total cycle, with an accuracy greater than 90% in predicting their real value. To reach the same precision the variables dry matter production and relative chlorophyll index would need five repetitions, leaf area six repetitions.

Keywords: Precision, accuracy, measurements.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos sorgo vem ganhando muito importância no Brasil, tanto por seus múltiplos usos (grãos, silagem, biomassa, vassoura) quanto por suas características de elevada eficiência fotossintética, adaptado a altas temperaturas e a ambientes sob condições de deficiência hídrica, diferentemente da maioria dos outros cereais (DURÃES *et al.*, 2012).

No Maranhão observou-se um aumento de 2,18% na produtividade de sorgo na safra de 2021/22 (produtividade de 2.296 quilos por hectares) e 3,2% de aumento de produção (produção atual de 22,7 mil toneladas), em relação à safra 2020/2021 (CONAB, 2022). Ainda existe uma expectativa de aumento da área cultivada com sorgo na segunda safra no Maranhão, em virtude principalmente da tolerância dessa cultura a condições de estresse hídrico, que a torna uma alternativa viável para o cultivo da segunda safra nas áreas de Cerrado (BICALHO *et al.*, 2018).

A cultura têm sido alvo de estudos em diferentes ambientes (ANDRADE *et al.*, 2016; BICALHO *et al.*, 2018; CARMO *et al.*, 2020), com objetivo de identificar genótipos adaptados e estáveis a diferentes cidades e regiões do Cerrado brasileiro. Entretanto, para recomendação de cultivares melhoradas é relevante que os experimentos de campo tenham um alto grau de precisão experimental e, conseqüentemente, uma alta acurácia na inferência sobre as médias genotípicas dos novos materiais (RESENDE e DUARTE, 2007).

Sendo assim, para se determinar com confiabilidade valores genotípicos, tornam-se necessária a utilização de técnicas que determinem o número mínimo de avaliações para que as metas de precisão no processo seletivo sejam atingidas (SILVA, 2019). Logo, uma das grandes utilidades do coeficiente de repetibilidade, é determinar quantas medições são necessárias em cada indivíduo para que a seleção fenotípica entre os genótipos seja feita com eficiência e com mínimo custo e mão de obra (CRUZ, REGAZZI e CARNEIRO, 2012).

Diante o exposto, destaca-se a importância de conhecer o coeficiente de repetibilidade e o número de repetições que as diferentes características agrônômicas do sorgo devem ser avaliadas, todavia relatos com tais informações são escassos, sobretudo para a cultura em Balsas, Maranhão.

Desta forma, buscou-se com este trabalho estimar os coeficientes de repetibilidade e o número de avaliações necessárias para se obter coeficiente de determinação igual a 90% em variáveis de genótipos de sorgo em Balsas-MA.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Os ensaios foram conduzidos na unidade de pesquisa agrônômica da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), no município de Balsas – MA, localizado na região sul do estado do Maranhão, latitude 7° 31' 59" S e longitude 46° 2' 6" W) (Figura 1).

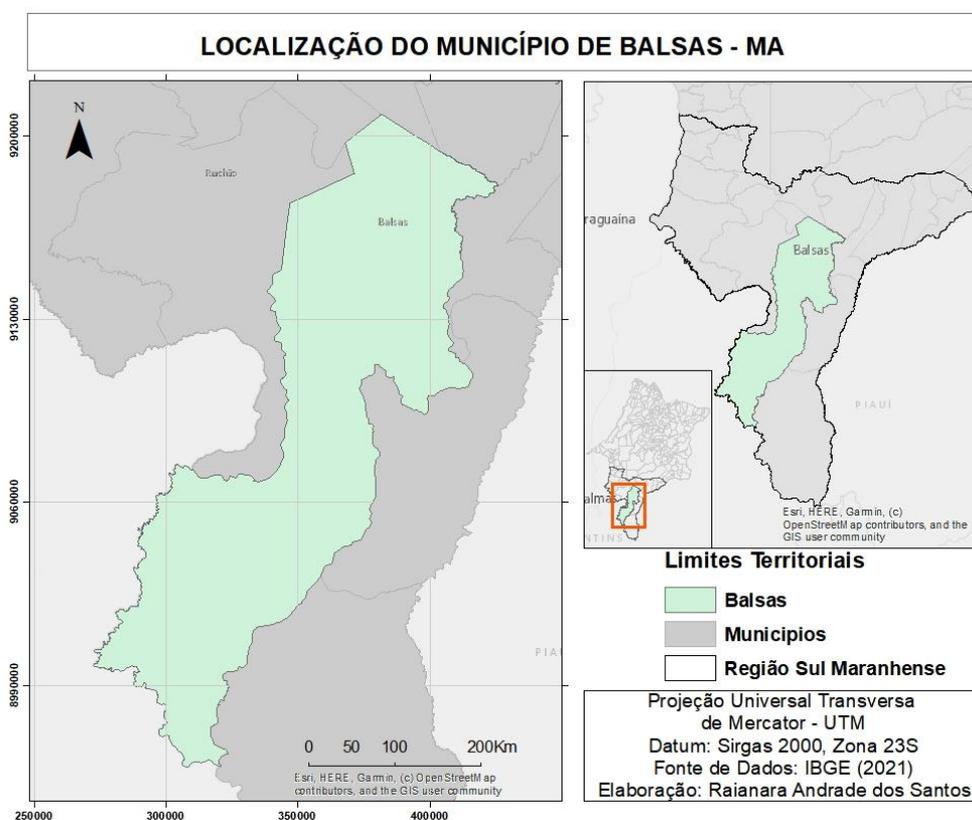


Figura 1 - Área de estudo localizada no município de Balsas, Maranhão.

Balsas apresenta um clima do tipo tropical quente e úmido (Aw) e temperatura média de 27.1 °C, de acordo com a classificação de Köppen e Geiger. A precipitação pluviométrica média anual é de 1175 mm, sendo que as maiores precipitações ocorrem nos meses de novembro a abril, quando concentram 85% do total nesse período (PASSOS, ZAMBRZYCKI e PEREIRA, 2017). Os dados meteorológicos de

temperatura e precipitação durante os meses de experimentação podem ser observados na Figura 2 e 3.

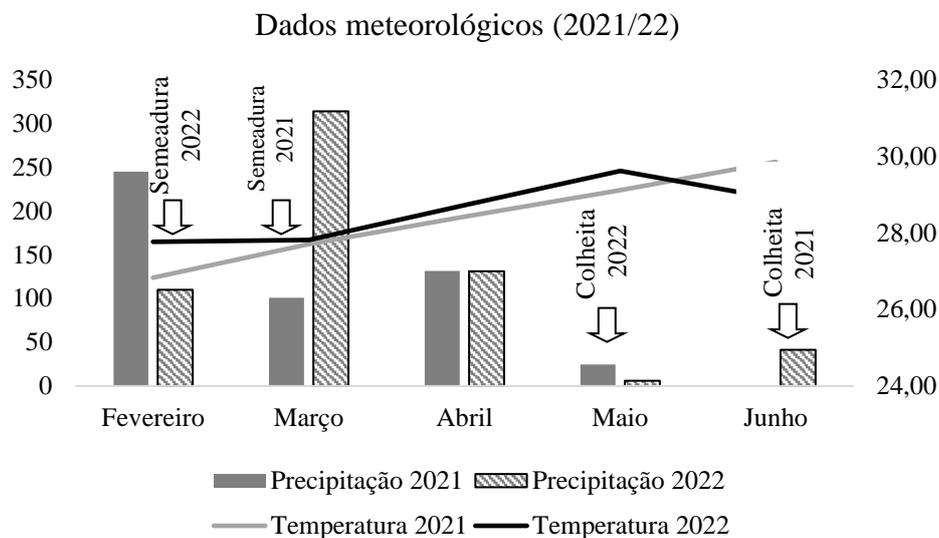


Figura 2 - Dados de temperatura média (°C) e precipitação pluvial (mm) durante os meses de execução do experimento em Balsas no ano de 2021 e 2022 (INMET, 2022).

A amostragem de solo foi realizada na profundidade de 0 a 0,20 m e as características químicas estão na Tabela 1. Os resultados foram utilizados para a recomendação de calagem e adubação segundo Borém *et al.* (2014).

Tabela 1- Atributos químicos do solo da área experimenta.

pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC total	V
em CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³	-----cmol/dm ³ -----							%
3,70	9,92	2,70	0,07	0,51	0,03	0,56	3,64	0,61	4,25	14,30

Foi aplicado na área 480 kg calcário dolomítico PRNT=88%. Para adubação de plantio foi aplicado o formulado NPK (5-25-15), dose 30 kg/ha de N, 60 kg/ha de P₂O₅ e 50 de K₂O. Para controle da vegetação espontânea foi aplicado em pré-emergência o herbicida atrazina. A adubação de cobertura com N foi realizada quando as plantas atingiram 30 cm.

2.2 Delineamento experimental

O sorgo foi cultivado em dois períodos de segunda safra (2021 e 2022), em delineamento experimental de blocos casualizados com três repetições e dez tratamentos

que correspondem as 10 cultivares de sorgo (Tabela 2) de diferentes aptidões agronômicas.

Tabela 2 - Cultivares avaliadas nas safras 2021 e 2022 no município de Balsas - MA.

Cultivar	Nome científico	Densidade	Aptidão ¹	Mantenedor
SUDAN 4202	<i>Sorghum sudanense</i> (Piper) Stapf	12	BIO/FOR	IPA
AGRI 001-E	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	8	BIO/FOR	TROPIGENE
AGRI 002-E	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	8	BIO/FOR	TROPIGENE
BRS 658	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	10	FOR	EMBRAPA
BRS 810	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench x <i>Sorghum sudanense</i> (Piper) Stapf	10	FOR	EMBRAPA
Ponta negra	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	12	FOR	EMBRAPA/EMPARN
BRS 373	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	12	GRAN	EMBRAPA
BRS 509	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	10	SAC	EMBRAPA
BRS 506	<i>Sorghum</i> spp	12	SAC	EMBRAPA
IPA467-4-2	<i>Sorghum</i> spp.	15	SAC	IPA

Cada parcela experimental foi constituída por cinco linhas de 5 metros de comprimento cada, espaçadas de 0,80 metros. As duas linhas laterais serviram de bordadura e as 3 centrais foram consideradas como área útil de avaliação, desconsiderando-se 0,5 m em cada extremidade destas linhas centrais

A semeadura foi realizada manualmente, distribuindo-se cerca de vinte sementes por metro. O desbaste ocorrerá quando as plantas atingiram o estágio de três folhas totalmente desenvolvidas.

Todos os tratos culturais seguiram as recomendações técnicas para a cultura do sorgo, apresentadas por Borém *et al.* (2014). Foram avaliadas 4 plantas por parcela para as características de a) a d).

Foram avaliadas as seguintes variáveis:

- a) **Altura das plantas (H)**, foi medida da superfície do solo até o ápice da panícula, com auxílio de uma trena expressa em metros;
- b) **Diâmetro do colmo (DC)**, foi medida com auxílio de um paquímetro digital, expresso em milímetros;
- c) **Número de folhas (NF)**, foi determinado por meio da contagem direta de folhas totalmente desenvolvidas;
- d) **Área foliar (AF)** das plantas foi determinado utilizando o método não destrutivo, através da fórmula área foliar (cm²) = comprimento (cm) × largura

(cm) \times 0,75, segundo a metodologia proposta por Hassan *et al.* (2010). O comprimento e a largura de folha foram avaliados em uma folha do terço médio da planta, nas quatro plantas por parcela, com auxílio de uma trena.

- e) **Dias para florescimento (DF)**, consistiu na quantidade de dias decorridos do plantio até o ponto em que 50% das plantas da parcela floresceram, verificada através do acompanhamento diário após início da floração.
- f) **Ciclo total (CT)**, foi realizado a contagem dos dias decorridos do plantio à colheita, realizada quando as plantas se encontravam no final da maturação fisiológica, quando cerca de 75% da matéria seca dos grãos estiverem acumulados, quando atingirem o grão pastoso.
- g) Para **Produção de matéria verde (PMV), em t ha⁻¹**, as plantas da área útil foram colhidas, identificadas e levadas ao laboratório para pesagem da matéria fresca de cada tratamento.
- h) **Produção de matéria seca (PMS), em t ha⁻¹**: amostras de cada parcela foram colhidas, pesadas e separadas em folhas, colmo e panículas. Em seguida, foram colocadas em sacos de papel, identificadas, e levadas à estufa a 65°C por 72 horas ou até apresentar peso constante.
- i) **Índice relativo de clorofila (IS)** na folha foi determinado com a utilização do clorofilômetro (Chlorophyll Meter SPAD-502), no terço médio de cada folha, evitando as bordas foliares e a região da nervura central em 4 plantas de cada parcela e em duas folhas localizadas no meio e no topo do dossel de cada planta.
- j) **Brix**: foi avaliado o teor de sólidos solúveis totais, por meio do índice °Brix. Para tanto, foi utilizado o refratômetro digital portátil da marca Quimis®.

2.3 Análise de repetibilidade

Primeiramente dados foram submetidos a análise de variância para cada variável para verificar a existência de variabilidade entre as cultivares. As avaliações em cada bloco foram consideradas como medições realizadas no mesmo indivíduo.

Os coeficientes de repetibilidade (r) foram estimados pelos métodos da análise de variância (ANOVA); análise dos componentes principais com base nas matrizes de correlações (CPcor) e análise dos componentes principais com base na matriz de variâncias e covariâncias (CPcov) e análise estrutural com base nas matrizes de correlações (AEcor).

Pelo método da ANOVA, utilizou-se o modelo estatístico com duas fontes de variação:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + a_j + e_{ij} \quad (1)$$

em que μ = média geral; g_i = efeito aleatório do i -ésimo indivíduo sob a influência do ambiente permanente; a_j = efeito fixo do ambiente na j -ésima medição; e_{ij} = efeito do ambiente temporário associado à j -ésima medição no i -ésimo genótipo.

A estimação do coeficiente de repetibilidade para o modelo ANOVA foi executado segundo a equação 2:

$$r = \frac{\hat{\sigma}_g^2}{\hat{\sigma}^2 + \hat{\sigma}_g^2} \quad (2)$$

em que $\hat{\sigma}_g^2$ é a variância entre as medidas repetidas em cada genótipo e $\hat{\sigma}^2$ é a variância residual.

O método da análise de componentes principais baseia-se na obtenção da matriz de correlações entre as medidas repetidas e posterior estimação dos autovalores e autovetores normalizados. O coeficiente segundo este método foi estimado por:

$$r = \frac{\hat{\lambda}_1 - 1}{\eta - 1} \quad (3)$$

em que $\hat{\lambda}_1$ é o autovalor da matriz de correlações associado ao autovetor cujos elementos tem mesmo sinal e magnitude semelhante; e η é o número de medições.

Pelo método baseado na matriz de variâncias e covariâncias fenotípicas, o coeficiente de repetibilidade foi obtido por:

$$r = \frac{\hat{\lambda}_1 - \hat{\sigma}_y^2}{\hat{\sigma}_y^2(n - 1)} \quad (4)$$

em que $\hat{\lambda}_1$ é o autovalor da matriz de variâncias e covariâncias fenotípicas associado ao autovetor cujos elementos tem o mesmo sinal e magnitude semelhante e $\hat{\sigma}_y^2 = \hat{\sigma}_g^2 + \hat{\sigma}^2$ é a variância fenotípica do caráter Y.

Pelo método da análise estrutural baseado na matriz de correlações o coeficiente de repetibilidade foi estimado por:

$$r = \frac{1}{n(n-1)\hat{\sigma}_y^2} \sum_j \sum_{j' \neq j} \hat{\sigma}_{jj'} \quad (5)$$

Neste caso, o estimador do coeficiente de repetibilidade corresponde à média aritmética das correlações fenotípicas entre genótipos, considerando cada par de medições.

O número mínimo de repetições (η_o) para predizer o valor real dos indivíduos (genótipos), com base nos coeficientes de determinação (R^2) pré-estabelecidos (0,80, 0,85, 0,90, 0,95 e 0,99), foi calculado conforme metodologia descrita em Cruz, Regazzi e Carneiro (2012), estimada por:

$$\eta_o = \frac{R^2(1 - r)}{(1 - R^2)r} \quad (6)$$

em que, η_o é o número de medidas necessárias para obtenção do coeficiente de determinação desejado (R^2) e r é o coeficiente de repetibilidade estimado.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa computacional GENES (CRUZ, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as variáveis apresentaram efeitos de genótipos significativos ($P < 0,05$) nos experimentos avaliados, que demonstra a possibilidade de aplicação dos estimadores do coeficiente de repetibilidade.

Analisando de modo geral os coeficientes de repetibilidade (r) de todas as variáveis estudadas (Tabela 3), observou-se que todas elas apresentaram valores de alta magnitude em todos os métodos (ANOVA, CPcor, CPcov, AEcor e AEcov), que indica regularidade na repetição dos desempenhos dos genótipos de sorgo de uma avaliação para outra.

Segundo Cruz, Regazzi e Carneiro (2012), quando a repetibilidade é alta, o acréscimo no número de repetições no ensaio resultará em pouco acréscimo de precisão, em relação à que se teria se um indivíduo fosse avaliado por meio de uma única observação.

Além disso, também foram observados valores elevados para coeficiente de determinação (R^2), todos superiores a 78,54% (Tabela 3), evidenciando precisão na predição do valor real de indivíduos a partir das três medições realizadas.

Tabela 3 - Estimativa da repetibilidade (r) e coeficiente de determinação (R²) das variáveis avaliadas em genótipos de sorgo.

		ANOVA	CPcov	CPcor	AEcor	AEcov	Médias
H	r	0,84	0,88	0,87	0,87	0,87	0,86
	R ²	93,88	95,53	95,25	95,23	95,11	95,00
NF	r	0,70	0,77	0,75	0,74	0,74	0,74
	R ²	87,64	91,07	89,83	89,70	89,74	89,60
DC	r	0,79	0,85	0,84	0,84	0,80	0,83
	R ²	92,01	94,46	94,07	94,06	92,42	93,40
AF	r	0,59	0,64	0,63	0,63	0,62	0,62
	R ²	81,22	84,16	83,63	83,47	82,85	83,06
DF	r	0,95	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96
	R ²	98,14	98,82	98,78	98,77	98,61	98,62
CT	r	0,98	0,99	0,99	0,99	0,97	0,98
	R ²	99,17	99,61	99,56	99,55	99,08	99,39
PMV	r	0,55	0,73	0,71	0,71	0,67	0,67
	R ²	78,54	89,02	87,86	87,85	86,01	85,86
PMS	r	0,57	0,71	0,67	0,67	0,66	0,66
	R ²	79,69	88,02	86,00	85,90	85,32	84,99
Brix	r	0,77	0,78	0,78	0,78	0,77	0,78
	R ²	90,89	91,33	91,39	91,37	91,10	91,22
IS	r	0,59	0,69	0,66	0,65	0,65	0,65
	R ²	81,34	87,19	85,11	84,85	84,97	84,69

(**CPcov**: componentes principais com base nas matrizes de covariância; **CPcor**: componentes principais com base nas matrizes de correlações; **AEcor**: análise estrutural com base nas matrizes de correlações; **AEcov**: análise estrutural com base nas matrizes de covariâncias; **H**: altura; **NF**: número de folhas; **DC**: diâmetro do colmo; **AF**: área foliar; **DF**: dias para florescimento; **CT**: ciclo total; **PMV**: produção de matéria verde; **PMS**: produção de matéria seca; **BRIX**: teor de sólidos solúveis totais; **IS**: Índice relativo de clorofila).

As variáveis altura (H), diâmetro do colmo (DC), dias para florescimento (DF) e ciclo total (CT) apresentaram estimativas de repetibilidade superiores a 0,79 e precisão acima de 92% (Tabela 3), que confirma que para estas características houve regularidade nas medições realizadas. Neste caso, poucas repetições são necessárias para avaliar o valor real do genótipo quanto a essa variável, podendo ser identificada sua superioridade com poucas medidas.

As menores estimativas de repetibilidade, mesmo ainda sendo consideradas altas, foram obtidos pela área foliar (AF), produção de matéria verde (PMV), produção de matéria seca (PMS) e índice relativo de clorofila (IS). O que demonstra maior influência do ambiente sobre estas características, em relação às demais.

Silva (2019) encontrou repetibilidade da massa seca total variando de 0,1370 a 0,3421 para espécies do gênero *Urochloa*, resultados inferiores ao encontrados nesse estudo.

As estimativas dos coeficientes de repetibilidades obtidos pelo método ANOVA foram inferiores aos obtidos pelas demais técnicas.

Como as medidas das características agrônômicas dos genótipos podem oscilar de maneira e intensidade diferentes, os coeficientes de repetibilidade estimados pela análise de variância podem não eliminar esse componente adicional do erro experimental, logo, esse estimador estaria subestimado (CRUZ, REGAZZI e CARNEIRO, 2012).

Para a maioria das características, com exceção do Brix e ciclo total (CT), o método de componentes principais usando matriz de covariância gerou as maiores estimativas de coeficientes de repetibilidades corroborando com os resultados de Cavalcante *et al.* (2012) em estudo em capim-elefante. Segundo Abeywardena (1972) os coeficientes de repetibilidade podem ser mais eficientemente estimados por meio de técnicas dos componentes principais, sendo o uso dessa metodologia mais enfatizado naquelas situações em que genótipos avaliados apresentem comportamento cíclico em relação ao caráter estudado.

Segundo Rezende e Duarte (2007) para uma inferência segura, deve-se almejar um coeficiente de determinação (R^2) igual ou superior a 81%, ou seja, com acurácia seletiva igual ou superior a 90%, pois, nesse caso, apresentam precisão experimental muito alta (CARGNELUTTI FILHO, BRAGA JUNIOR e LÚCIO, 2012).

A tabela 4 mostra o número de repetições (η_0) necessário para predizer o valor real dos indivíduos com base nos valores de R^2 pré-estabelecidos. Considerando-se R^2 igual a 81% as três repetições utilizadas nos ensaios com genótipos de sorgo foram suficientes para todas as variáveis estudadas. Todavia, para discussão dos resultados nesse estudo considerou-se um R^2 de 90%.

Para produção de matéria verde os genótipos avaliados demandam em média quatro repetições para obter precisão de 90%, produção de matéria seca e índice relativo de clorofila em média cinco medições e para área foliar em média seis medições, para obtenção da mesma precisão (90%) na predição do valor real dos indivíduos avaliados.

Para obter uma precisão de 99% seriam necessárias 15 medições para H, 19 para DC, 34 para NF, 58 para AF, quatro para DF, um para CT, 41 PMV, 48 para PMS, 28 para Brix e 52 para IS. É possível observar que para se obter 99% de precisão das

informações coletadas em ensaios de sorgo, um incremento pequeno em relação à 90% e muitas as medidas são necessárias, o que de forma prática seria inviável para algumas variáveis a quantidade de repetições, como PMV, isso devido os elevados custos com materiais e mão de obra.

Tabela 4 - Número mínimo de repetições (η_O) necessário para predizer o valor real dos indivíduos (genótipos) para cada variável, com base nos coeficientes de determinação (R^2) pré-estabelecidos.

Método	R ²	H	DC	NF	AF	DF	CT	PMV	PMS	BRIX	IS
ANOVA	0,80	1	1	2	3	0	0	3	3	1	3
	0,85	1	2	2	4	0	0	5	4	2	4
	0,90	2	2	4	6	1	0	7	7	3	6
	0,95	4	5	8	13	1	1	16	15	6	13
	0,99	19	26	42	69	6	3	81	76	30	68
CPcov	0,80	1	1	1	2	0	0	2	2	1	2
	0,85	1	1	2	3	0	0	2	2	2	3
	0,90	1	2	3	5	0	0	3	4	3	4
	0,95	3	3	6	11	1	0	7	8	5	8
	0,99	14	17	29	56	4	1	37	40	28	44
CPcor	0,80	1	1	1	2	0	0	2	2	1	2
	0,85	1	1	2	3	0	0	2	3	2	3
	0,90	1	2	3	5	0	0	4	4	3	5
	0,95	3	4	7	11	1	0	8	9	5	10
	0,99	15	19	34	58	4	1	41	48	28	52
AE	0,80	1	1	1	2	0	0	2	2	1	2
	0,85	1	1	2	3	0	0	2	3	2	3
	0,90	1	2	3	5	0	0	4	4	3	5
	0,95	3	4	7	11	1	0	8	9	5	10
	0,99	15	19	34	59	4	1	41	49	28	53

(**CPcov**: componentes principais com base nas matrizes de covariância; **CPcor**: componentes principais com base nas matrizes de correlações; **AEcor**: análise estrutural com base nas matrizes de correlações; **AEcov**: análise estrutural com base nas matrizes de covariâncias; **H**: altura; **NF**: número de folhas; **DC**: diâmetro do colmo; **AF**: área foliar; **DF**: dias para florescimento; **CT**: ciclo total; **PMV**: produção de matéria verde; **PMS**: produção de matéria seca; **BRIX**: teor de sólidos solúveis totais; **IS**: Índice relativo de clorofila).

Ribeiro *et al.* (2015) em seu estudo de repetibilidade de híbridos de milho considerando 80% de precisão determinou que nove medições eram suficientes para os caracteres avaliados (altura, comprimento da espiga, diâmetro da espiga, massa de 100 grãos).

Levando-se em consideração um R^2 de 85% (superior aos 81% determinados por Rezende e Duarte (2007)), as variáveis H, DC, DF e CT necessitam de uma medição, NF e Brix duas medições, AF, PMV, PMS e IS três medições. Corroborando com

Machado (2018), com esses resultados é possível observar uma redução considerável do tempo de avaliação, que se torna menos morosa e onerosa.

Desta forma, conforme o coeficiente de determinação (R^2) estabelecido por Rezende e Duarte (2007), igual ou superior a 81%, as 3 repetições realizadas nos ensaios experimentais levaram a uma inferência segura das variáveis analisadas nas condições edafoclimáticas de Balsas-MA, levando em consideração o conjunto gênico avaliado.

4. CONCLUSÃO

Os ensaios experimentais de sorgo, para cultivares estudadas, com três repetições são capazes de identificar genótipos superiores, em relação as variáveis altura, diâmetro do colmo, dias para florescimento e ciclo total, com uma exatidão superior a 90% na predição de seu valor real.

Para alcançar 90% de precisão, almejado nesse estudo, as variáveis produção de matéria seca e índice relativo de clorofila necessitariam de cinco medições, área foliar seis medições para predição com confiabilidade do valor real dos indivíduos avaliados.

REFERÊNCIAS

- ABEYWARDENA, V. An application of principal component analysis in genetics. **Journal of Genetics**, v.61, p.27-51, 1972.
- ANDRADE, L. C.; MENEZES, C. B.; SILVA, K. J.; SANTOS, C. V.; EMYGDIO, B. M.; TARDIN, F. D. Avaliação de produtividade, adaptabilidade e estabilidade genotípica de sorgo granífero em três ambientes. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 37, n. 1, p. 36-43, 2016.
- BICALHO, T. F.; OLIVEIRA, A. M. E.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; FREITAS, R. S. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de sorgo granífero em Uberaba - MG, Patos de Minas - MG e Votuporanga – SP. **Cadernos de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 3, p. 01–08, 2018.
- BORÉM, A.; PIMENTEL, L. PARRELA, R. **Sorgo: do plantio à colheita**. Viçosa-MG: Ed. UFV, 2014. 275 p.
- CAVALCANTE, M.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; PITA, E. B. A.; FERREIRA, R. L. C.; TABOSA, J. N. Coeficiente de repetibilidade e parâmetros genéticos em capim-elefante. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.47, n.4, p.569-575, 2012.
- CARMO, E. L.; SOUSA, J. V. A.; FERREIRA, C. J. B.; BRZ, G. B. P.; SIMON, G. A. Agronomic Performance Of Grain Sorghum Cultivated In Double Rows Space On Brazilian Cerrado. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 2, p. 422 - 432, 2020.
- CARGNELUTTI FILHO, A. BRAGA JUNIOR, R L. C.; LÚCIO, A. D. C. Medidas de precisão experimental e número de repetições em ensaios de genótipos de cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.47, n.10, p.1413-1421, 2012.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S., 1958 - Modelos **biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2012. 514 p.
- CRUZ, C. D. GENES: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 35, p. 271-276, 2013.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2022/23 - primeiro levantamento. Brasília – DF: **Conab**, v. 10, n. 1, outubro 2022
- DUARTE, J. O. Mercado e comercialização. In: RODRIGUES, J. A. S. **Cultivo do sorgo**. 2015. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de produção, 2). Disponível em: <<https://www.spo.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 06 junho de 2021.
- DURÃES, F. O. M.; PARRELLA, R. A. C. Sistema agroindustrial do sorgo sacarino no Brasil e a participação público-privada: oportunidades, perspectivas e desafios. Documentos 138 - **Embrapa Milho e Sorgo**, 2012.

EMBRAPA. **Dinâmica agrícola no Cerrado: análises e projeções**. – Brasília, DF: Embrapa, 2020.

HASSAN, M.; CHRISTOPHER, B. S. T.; GHIZAN, S.; AHMAD, B. S.; MOHAMMED, E. A.; BEHNAM, K. 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.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. **Dados meteorológicos diários (2021/2022)**. Brasília - DF, 1992.

MACHADO, I.P. **Estimativas de repetibilidade e predições de ganhos genéticos em clones de cajueiro-anão**. 2018. 59 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas - MA. **Revista Scientia Agraria**, v.18, n.1, p.83-89, 2017.

RESENDE, M. D. V. de; DUARTE, J.B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, p.182-194, 2007.

RIBEIRO, L. P.; TEODORO, P. E.; CORREA, C. C. G.; LUIZ JUNIOR, R. A. A.; TORRES, F. E. Número de repetições necessárias para identificação de diferenças entre tipos de híbridos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.3, p. 392-399, 2015.

SILVA, R. B. **Repetibilidade e seleção em genótipos de *Urochloa* spp.** 2019. 58 p. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) - Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2019.