

PLASTICIDADE FENOTÍPICA DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA
NO ENFRENTAMENTO AO DÉFICIT HÍDRICO

JARDEL DA SILVA FIGUEIREDO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
JULHO – 2025

PLASTICIDADE FENOTÍPICA DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA NO ENFRENTAMENTO AO DÉFICIT HÍDRICO

JARDEL DA SILVA FIGUEIREDO

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Genética e Melhoramento de Plantas”

Orientador: Prof. Dr. Antonio Teixeira do Amaral Júnior

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JULHO - 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

F475

Figueiredo, Jardel da Silva.

Plasticidade fenotípica de linhagens de milho-pipoca no enfrentamento ao déficit hídrico / Jardel da Silva Figueiredo. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

109 f.

Bibliografia: 82 - 95.

Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2025.
Orientador: Antonio Teixeira do Amaral Junior.

1. *Zea mays* var. *everta* . 2. Sustentabilidade agrícola. 3. Escassez hídrica. 4. Tolerância a seca. 5. Melhoramento genético . I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 631.5233

PLASTICIDADE FENOTÍPICA DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA NO ENFRENTAMENTO AO DÉFICIT HÍDRICO

JARDEL DA SILVA FIGUEIREDO

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Genética e Melhoramento de Plantas.”

Aprovada em 28 de julho de 2025.

Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente

WEVERTON PEREIRA RODRIGUES

Data: 21/10/2025 07:10:49-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Weverton Pereira Rodrigues (D.Sc., Produção Vegetal) - UEMASUL



Documento assinado digitalmente

VALTER JARIO DE LIMA

Data: 21/10/2025 11:08:34-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Valter Jário de Lima (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) - UVA



Documento assinado digitalmente

ELIEMAR CAMPOSTRINI

Data: 24/10/2025 08:19:48-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Eliemear Campostrini (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF

Prof. Antônio Teixeira do Amaral Junior (D.Sc., Genética e Melhoramento) - UENF
(Orientador)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Janúbio e Genilda, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos e por todo apoio, mesmo à distância. A presença de vocês se fez sentir em cada conquista desta jornada.

À minha irmã Kamila e à minha sobrinha Laura, que, mesmo longe, enchem minha vida de carinho, orgulho e alegria.

E à Isabela pelo companheirismo, paciência e apoio constante, tornando este caminho mais leve e especial.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação é fruto de uma jornada repleta de desafios, aprendizados e descobertas, que não teria sido possível sem o apoio, incentivo e colaboração de muitas pessoas. Expresso aqui minha mais profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho;

Ao meu orientador, Prof. Antonio Teixeira do Amaral Júnior, pela orientação dedicada, paciência e confiança depositada em mim ao longo de todo o processo. Seu comprometimento, profissionalismo e exemplo de ética foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para o meu amadurecimento acadêmico;

Ao Prof. Valter Jário de Lima e ao Dr. Talles, pela disponibilidade constante, pelas valiosas contribuições e pelo incentivo em cada etapa deste trabalho. A experiência, o comprometimento e a visão científica de ambos foram essenciais para o aprimoramento desta dissertação;

À Danielle, minha parceira de experimento, pela colaboração, apoio e companheirismo durante o desenvolvimento da pesquisa;

Aos colegas de laboratório, professores e amigos que, com trocas de ideias, incentivo e amizade, contribuíram para o meu crescimento pessoal e científico;

Aos meus pais, Janúbio e Genilda, por serem minha base e minha inspiração. Mesmo sem terem tido a oportunidade de estudar, fizeram questão de que eu tivesse acesso à melhor educação possível. O esforço, a coragem e os valores que me transmitiram foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Esta conquista é, antes de tudo, de vocês;

À minha irmã Kamila, pelo exemplo de determinação, que sempre me inspirou com sua trajetória e amor pela educação; à minha sobrinha Laura, por trazer alegria e leveza aos meus dias; e à Isabela, pelo carinho, compreensão e apoio constante durante esta caminhada, cuja presença foi essencial nos momentos de incerteza e superação;

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), pela oportunidade de realização do curso de mestrado, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001 – pela concessão da bolsa de estudos, e à FAPERJ, pelo apoio financeiro ao projeto;

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta jornada, deixo o meu mais sincero agradecimento.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo geral	5
2.2 Objetivos específicos	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1 Características gerais do milho-pipoca	6
3.2 Condições ambientais e desafios para o cultivo de milho-pipoca	8
3.3 Características para seleção de genótipos superiores em condição de limitação hídrica	9
3.4 Melhoramento genético para tolerância ao estresse hídrico em milho- pipoca.....	12
3.5 Análise GT <i>Biplot</i>	16
4. MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1 Material vegetal	18
4.2 Condições experimentais	20
4.3 Características avaliadas	22
4.3.1 Características morfológicas	23
4.3.2 Características agronômicas	24
4.3.3 Mensuração do teor relativo de clorofila e pigmentos acessórios	24

4.3.4 Estimativa da tolerância à seca e eficiência no uso da água	24
4.4 Análises estatísticas	24
4.4.1 Análise de variância	24
4.4.2 Análise GT <i>Biplot</i>	25
4.4.3 Agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott	25
4.4.4 Estimativas do coeficiente de correlação de Pearson	26
4.4.5 Diversidade entre acessos	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 Análise de variância individual e conjunta, estimativa de parâmetros genéticos e efeitos da restrição hídrica em características morfoagronômicas e fisiológicas	28
5.2 Parâmetros genéticos	33
5.3 Influência relativa do déficit hídrico	37
5.4 Análise do agrupamento de linhagens de milho-pipoca avaliadas sob diferentes regimes hídricos	41
5.5 <i>Performance</i> genotípica via eficiência agronômica no uso da água e tolerância ao estresse hídrico	54
5.6 Estimativas do coeficiente de correlação de Pearson entre características morfoagronômicas e fisiológicas	59
5.7 Dispersão GT <i>Biplot</i>	64
5.8 Análise de diversidade genética	76
6. CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

RESUMO

FIGUEIREDO, Jardel da Silva; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; julho de 2025; Plasticidade fenotípica de linhagens de milho-pipoca no enfrentamento ao déficit hídrico; Orientador: D.Sc. Antonio Teixeira do Amaral Júnior; Conselheiros: D.Sc. Eliemar Campostrini e D.Sc. Geraldo de Amaral Gravina.

O milho-pipoca é um cereal de grande importância global com considerável expansão de cultivo no Brasil, que é o terceiro maior produtor mundial do grão, ficando atrás apenas dos Estados Unidos da América e da Argentina. Contudo, as mudanças climáticas com a consequente escassez de água representam desafios para a produção dessa cultura, causando impactos significativos na produtividade. Diante deste cenário, atuar por meio do melhoramento de plantas é a estratégia mais viável para a obtenção de cultivares tolerantes ao déficit hídrico com vistas ao desenvolvimento de um modelo agrícola mais sustentável. Posto isso, objetivou-se com este trabalho avaliar a aptidão fenotípica de um painel de quarenta linhagens de milho-pipoca do Banco Ativo de Germoplasma da UENF quanto à adaptação à restrição hídrica no solo, bem como identificar características de fácil mensuração associadas ao rendimento de grãos e à capacidade de expansão, com potencial para serem utilizadas na seleção indireta de genótipos mais tolerantes ao déficit hídrico, e, por fim, estimar a diversidade genética do painel de linhagens avaliadas para guiar cruzamentos no programa de melhoramento para obtenção de híbridos superiores. Para tanto, características morfoagronômicas e fisiológicas foram avaliadas, a saber: altura de espiga (AE), altura da planta (AP), diâmetro de espiga

(DESP), comprimento de espiga (CESP), número de fileiras de grãos por espiga (NFG), número de grãos por fileira (NGF), massa de cem grãos (MCG), rendimento de grãos (RG), capacidade de expansão (CE), conteúdo foliar de clorofila (CHL), teor de flavonoides (FLAV), teor de antocianina (ANTH) e índice de balanço de nitrogênio (NBI). O experimento foi realizado a céu aberto no período de abril a agosto de 2024, em delineamento experimental em blocos completos casualizados com três repetições, sob duas condições hídricas contrastantes – WW (irrigação plena, 100% capacidade de campo) e WS (déficit hídrico, 68% capacidade de campo). As parcelas experimentais, compostas por 23 plantas cada, foram cultivadas com espaçamento de 0,20 m entre plantas e 0,80 m entre linhas. A irrigação foi realizada por gotejamento, com estresse induzido no ambiente WS pela suspensão da oferta de água aos dez dias antes do florescimento masculino até a maturação fisiológica. O período imediatamente após os vinte e dois dias de suspensão a irrigação foi o momento que se destacou como o ideal para avaliar as características foliares, por possibilitar que houvesse valores mais pronunciados para determinadas variáveis fisiológicas. Nesse período houve o maior decréscimo nos flavonoides e aumento no índice de balanço de nitrogênio, indicando um ponto de equilíbrio entre o estresse sofrido e os mecanismos de adaptação da planta. Foram estimadas as médias das características, além do índice de tolerância ao estresse hídrico (STI), bem como a eficiência agronômica no uso da água em condição de estresse (WUEws) e bem irrigada (WUEww). Os dados foram submetidos à análise de variância individual e conjunta. As associações entre as características foram obtidas por meio da correlação de Pearson. Na análise GT *Biplot* identificaram-se as linhagens com melhores desempenhos para os caracteres estudados por meio do gráfico *which-won-where*. Já as linhagens mais estáveis foram identificadas por meio do gráfico *means x stability*; por sua vez os caracteres com maior poder discriminante foram discriminados pela análise *discriminant x representative*; por fim, o genótipo mais próximo do genótipo ideal, isto é, ideótipo, foi identificado pela análise *ranking genotypes*. A análise de variância conjunta revelou ausência de variabilidade entre as linhagens para as características morfológicas AE e AP, tanto sob condição de estresse hídrico (WS) quanto sob irrigação plena (WW). Dentre as características agronômicas, apenas CESP não apresentou significância, ao passo que as demais, como NGF, NFG, DESP e MCG, exibiram variabilidade significativa. No que diz respeito aos

pigmentos foliares avaliados quatro dias após a suspensão da irrigação (4 DASI), apenas CHL apresentou significância, enquanto FLAV, ANTH e NBI não foram significativos. Aos 11 DASI, observou-se o inverso: CHL não foi significativa, mas FLAV, ANTH e NBI apresentaram significância. Aos 22 DASI, CHL, FLAV e ANTH foram significativos, enquanto NBI não demonstrou significância. Por fim, aos 31 DASI, todas as características pigmentares mostraram-se significativas. O estresse hídrico afetou de forma expressiva o desempenho dos genótipos, sobretudo para as características relacionadas à produtividade. Esses resultados ressaltam a importância de identificar e selecionar genótipos mais tolerantes ao déficit hídrico, com o objetivo de garantir estabilidade produtiva em ambientes adversos. Variáveis de fácil mensuração, como CHL, FLAV, ANTH e NBI, mostraram-se associadas ao desempenho produtivo e à tolerância à seca, sendo promissoras como opções para a seleção indireta de genótipos mais adaptados. Recomenda-se a implementação de dialelo parcial entre o grupo de linhagens (L65, P3 e L75), que apresentou elevado desempenho produtivo, e o grupo (L273, L294, L61 e L203), que embora tenha exibido desempenho inferior, possui genótipos com maior divergência genética para com aquele grupo. Outra opção, com base no índice de eficiência agrônômica no uso da água e em resultados de produtividade, é a implementação de dialelo completo entre as linhagens L65, L75, L217, P2, P3, P7 e P8. Ambas as opções tendem a gerar híbridos simples com superioridade produtiva e adaptados à seca.

Palavras-chave: *Zea mays* var. *everta*; sustentabilidade agrícola; escassez hídrica; tolerância à seca.

ABSTRACT

FIGUEIREDO, Jardel da Silva; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; July 2025; Phenotypic plasticity of popcorn maize lines in response to water deficit; Advisor: D.Sc. Antonio Teixeira do Amaral Júnior; Committee Members: D.Sc. Eliemar Campostrini and D.Sc. Geraldo de Amaral Gravina.

Popcorn is a cereal of great global importance and has experienced considerable expansion in cultivation in Brazil, which is currently the third-largest producer of this grain, behind only the United States of America and Argentina. However, climate change and the resulting water scarcity pose significant challenges for the production of this crop, causing substantial impacts on yield. In this context, plant breeding stands out as the most viable strategy for developing drought-tolerant cultivars aimed at building a more sustainable agricultural model. Therefore, this study aimed to evaluate the phenotypic aptitude of a panel of forty popcorn maize inbred lines from the UENF Active Germplasm Bank regarding adaptation to soil water restriction, as well as to identify easily measurable traits associated with grain yield and popping expansion capacity, with potential use in the indirect selection of drought-tolerant genotypes. Lastly, the study aimed to estimate the genetic diversity of the evaluated panel to guide crosses in the breeding program for obtaining superior hybrids. For this purpose, morpho-agronomic and physiological traits were evaluated, namely: ear height (EH), plant height (PH), ear diameter (ED), ear length (EL), number of grain rows per ear (NGR), number of grains per row (NGRR), hundred-grain weight (HGW), grain yield (GY), popping expansion (PE), leaf

chlorophyll content (CHL), flavonoid content (FLAV), anthocyanin content (ANTH), and nitrogen balance index (NBI). The experiment was carried out in the open field from April to August 2024, using a randomized complete block design with three replications under two contrasting water regimes – well-watered (WW) and water-stressed (WS) conditions. Each experimental plot consisted of 23 plants, spaced 0.20 m apart within rows and 0.80 m between rows. Irrigation was applied via drip system, and water stress was induced in the WS environment by suspending irrigation ten days before male flowering until physiological maturity. The period immediately after 22 days of suspended irrigation was identified as the optimal time to evaluate the leaf traits, as it allowed for more pronounced values in certain physiological variables. During this period, there was a noticeable decrease in flavonoids and an increase in NBI, indicating a balance point between the stress experienced and the plant's adaptation mechanisms. Means were estimated for each trait, along with the stress tolerance index (STI) and agronomic water use efficiency under stress (WUE_{ws}) and well-watered (WUE_{ww}) conditions. The data were subjected to individual and joint analysis of variance. Associations among traits were obtained through Pearson correlation. The GT Biplot analysis identified the best-performing inbred lines for the studied traits using the which-won-where graph. The most stable lines were identified by the means × stability graph, while the most discriminating traits were determined through the discriminant × representative analysis. The genotype closest to the ideal (ideotype) was identified using the ranking genotypes analysis. The joint analysis of variance revealed no variability among the lines for the morphological traits EH and PH under both water conditions (WS and WW). Among agronomic traits, only EL was not significant, whereas others such as NGR, ED, and HGW showed significant variability. Regarding foliar pigments evaluated at four days after irrigation suspension (4 DASI), only CHL was significant, while FLAV, ANTH, and NBI were not. At 11 DASI, the opposite was observed: CHL was not significant, whereas FLAV, ANTH, and NBI were. At 22 DASI, CHL, FLAV, and ANTH were significant, while NBI was not. Finally, at 31 DASI, all pigment traits were significant. Water stress significantly affected genotype performance, especially for productivity-related traits. These results highlight the importance of identifying and selecting drought-tolerant genotypes to ensure yield stability under adverse conditions. Easily measurable variables such as CHL, FLAV, ANTH, and NBI were associated with yield and drought tolerance, showing promise

for indirect selection. It is recommended to implement a partial diallel among the group of high-performing lines (L65, P3, and L75) and the group (L273, L294, L61, and L203), which, despite lower performance, shows greater genetic divergence. Another option, based on agronomic water use efficiency and yield results, is to implement a complete diallel among lines L65, L75, L217, P2, P3, P7, and P8. Both strategies are expected to generate superior and drought-adapted single-cross hybrids.

Keywords: *Zea mays* var. *everta*; sustainable agriculture; water deficiency; drought tolerance.

1. INTRODUÇÃO

O milho-pipoca (*Zea mays* L. var. *everta*) destaca-se como um dos cereais de maior relevância global. Sua ampla adoção ocorre devido à versatilidade e adaptabilidade abrangente (Mafra et al., 2021). Trata-se de uma espécie nativa das Américas e cultivada exclusivamente para o consumo humano. O milho-pipoca se diferencia dos demais tipos de milho principalmente em sua estrutura morfológica, destacando-se pelo menor tamanho e peso dos grãos, que são notavelmente mais leves e compactos em comparação com os grãos de outras variedades (Zhang et al., 2024). Todavia, a principal característica distintiva do milho-pipoca dos demais tipos de milho é sua capacidade de expansão dos grãos, decorrente de possuir uma casca externa mais dura e um endosperma mais denso, o que é essencial para a sua capacidade de estourar quando aquecido (Zinsly e Machado, 1980; Silva et al., 1993; Sawazaki, 2001; Paes, 2006).

A pipoca, resultado da expansão do grão, é um alimento altamente nutritivo, destacando-se pelo elevado teor de antioxidantes, além de ser uma excelente fonte de proteínas, fibras, vitaminas, açúcares e gorduras (Leite et al., 2022). Popular e amplamente apreciada não apenas pelo sabor, mas também por seus benefícios nutricionais, a pipoca possui um alto teor de fibras e antioxidantes, sendo especialmente rica em ácidos fenólicos, compostos concentrados principalmente no pericarpo do grão (Vukadinović et al., 2024).

Esses antioxidantes permanecem amplamente bioacessíveis após a digestão, permitindo sua absorção pelo organismo e potencialmente contribuindo

para a saúde (Coco Jr. e Vinson, 2019). Além dos ácidos fenólicos, a pipoca contém outros compostos bioativos, como ácido fítico, glutatona, carotenoides e tocoferóis, que possuem propriedades antioxidantes. Esses compostos auxiliam na proteção das células contra danos oxidativos, reforçando os benefícios desse alimento na dieta (Vukadinović et al., 2024).

No *ranking* global de produção e consumo, o Brasil ocupa a terceira posição, enquanto o maior mercado para pipoca encontra-se nos Estados Unidos da América (Embrapa, 2025). Além disso, a pipoca é reconhecida não apenas pelo seu elevado valor nutracêutico, mas também por seu significativo valor agregado, contribuindo para dinamizar um mercado de grande relevância, especialmente nos Estados Unidos da América que teve uma produção de aproximadamente 375 mil toneladas desse grão em 2023 (Embrapa, 2025). O Brasil tem feito avanços significativos no melhoramento genético do milho-pipoca, principalmente através de instituições públicas que desenvolvem novos híbridos com maior capacidade de expansão e rendimento (Caranhato et al., 2022).

A produção de milho, no cenário atual, está fortemente condicionada aos fatores climáticos, os quais impactam a produtividade nas principais áreas agrícolas do Brasil e do mundo (Kamphorst et al., 2018; Hussain et al., 2019; Bigolin e Talamini, 2024). Como impacto negativo das mudanças climáticas, tem-se a ocorrência de episódios mais severos de escassez de água e má distribuição das chuvas, fatores que comprometem significativamente o desempenho das safras, causando sérios danos à produção de alimentos, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (Viana et al., 2022). A indisponibilidade de água tem se tornado cada vez mais crítica e os períodos de seca têm ocorrido com maior frequência e intensidade, impactando de forma significativa a produtividade e gerando uma situação preocupante em relação à sustentabilidade agrícola e à segurança alimentar (Araus et al., 2018; Wang et al., 2020; Salari et al., 2023).

A restrição de água no solo desencadeia uma série de aclimações fisiológicas e bioquímicas nas plantas que podem comprometer sua produtividade. Dentre essas alterações, destacam-se a redução da condutância estomática e da transpiração, mecanismos que minimizam a perda de água (Seleiman et al., 2021). Para aumentar a tolerância ao déficit hídrico, as plantas acumulam solutos osmoprotetores, como a prolina, e ajustam o metabolismo do nitrogênio, favorecendo a adaptação ao estresse hídrico (Seleiman et al., 2019).

A regulação hormonal e osmótica, mediada principalmente por fitohormônios como o ácido abscísico, desempenha um papel essencial na resposta ao déficit hídrico (Gupta et al., 2020). Além disso, embora a capacidade fotossintética seja frequentemente reduzida sob estresse hídrico, as plantas adotam ajustes bioquímicos e moleculares para preservar a eficiência fotossintética e mitigar os impactos do déficit hídrico (Seleiman et al., 2019). Em conjunto, esses efeitos têm influências negativas e significativas no rendimento das plantas, dentre elas, o milho-pipoca (Viana et al., 2022), uma cultura particularmente sensível ao déficit hídrico.

A capacidade de adaptação a ambientes com recursos naturais limitados é essencial para reduzir os impactos negativos das mudanças climáticas (Leite et al., 2022), especialmente considerando que muitos agricultores enfrentam restrições financeiras que dificultam a implementação de sistemas de irrigação. Nesse cenário, a escolha de genótipos com mais resistência ao déficit hídrico surge como a estratégia mais economicamente viável para mitigar os efeitos adversos dos períodos prolongados de estiagem e escassez hídrica (Santos et al., 2021).

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) tem avançado com um Programa de Melhoramento de milho-pipoca que explora diferentes aspectos do melhoramento da cultura, incluindo a adaptação de genótipos ao estresse hídrico (Kamphorst et al., 2018; Kamphorst et al., 2020; Kamphorst et al., 2021a; Lima et al., 2021; Leite et al., 2022; Carvalho et al., 2023; Schmitt et al., 2024). Nesse contexto, a UENF possui a maior coleção de acessos de milho-pipoca da América Latina, com linhagens S₇ provenientes de regiões de clima temperado e tropical (Kurosawa et al., 2018). Além das linhagens desenvolvidas na UENF, outras foram fornecidas pelos principais institutos de pesquisa das Américas, com destaque para o CIMMYT, localizado no México e que tem atuação global.

Informações disponíveis no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) denotam que o número de cultivares de milho-pipoca registradas no Brasil é limitado (MAPA), sendo a maioria controlada por empresas privadas que possuem estrutura e interesse comercial para investir no registro e na multiplicação de sementes, enquanto as instituições públicas desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de novos híbridos com maior rendimento e melhor capacidade de expansão da pipoca, embora muitas vezes não avancem até

o registro comercial (Kamphorst et al., 2021a; Santos Junior et al., 2023; Silva, 2023). Dentre as cultivares registradas no MAPA, apenas uma é recomendada por sua tolerância à seca, a saber, o híbrido WS01, desenvolvido pela UENF (Lima et al., 2021). Para tornar esse quantitativo mais expressivo, necessita-se que novas linhagens sejam testadas para que sirvam de subsídio em programas de melhoramento para geração de genótipos superiores com adaptação às condições de seca.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar um painel de quarenta linhagens de milho-pipoca, oriundas do Banco de Germoplasma da UENF, quanto à sua adaptabilidade em ambientes contrastantes, visando classificá-las com base em características morfoagronômicas e fisiológicas, de acordo com seus níveis de resistência à seca e eficiência no uso da água. Além disso, busca-se identificar características de fácil mensuração que possam ser utilizadas na seleção indireta de genótipos superiores para cultivo em condições de restrição hídrica no solo. Espera-se que este estudo represente um passo fundamental para o desenvolvimento de cultivares-élite resistentes à seca, além de contribuir para a seleção mais eficiente, rápida e não destrutiva de genótipos promissores.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Discriminar linhagens de milho-pipoca resistentes ao déficit hídrico e com bom desempenho em ambiente irrigado, com base em características morfoagronômicas e fisiológicas, visando ao aproveitamento de competências quanto à plasticidade fenotípica para implementação de programa de intercruzamentos.

2.2. Objetivos específicos

1. Avaliar características morfoagronômicas em linhagens de milho-pipoca sob diferentes condições hídricas;
2. Investigar respostas fisiológicas das linhagens de milho-pipoca sob diferentes condições hídricas, avaliando variáveis relacionadas aos índices de pigmentos foliares;
3. Estimar o grau de correlação entre características morfoagronômicas e fisiológicas sobre o rendimento de grãos e capacidade de expansão das linhagens de milho-pipoca; e
4. Discriminar características de fácil mensuração correlacionadas com rendimento de grãos e capacidade de expansão para a seleção indireta de genótipos eficientes no uso da água e com elevada tolerância à seca.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Características gerais do milho-pipoca

O milho-pipoca pertence à família Poaceae, subfamília Panicoide, tribo Maydeae, gênero *Zea*, espécie *Zea mays* L., var. *everta* (Sturtev) L.H. Bailey (Mangesldorf et al., 1964; Galinat, 1979; Paterniani e Campos, 2005). Comparado ao milho comum, apresenta grãos menores, maior prolificidade, porte menor, colmo mais fino e frágil, menor número de folhas e maior suscetibilidade a doenças (Zinsly e Machado, 1980; Silva et al., 1993; Sawazaki, 2001). A principal diferença entre os dois tipos de milho está na capacidade que o milho-pipoca possui de expandir seus grãos (Silva et al., 1993). Esse processo, chamado de pipocamento, é descrito como uma explosão provocada pela expansão quando os grãos são submetidos a temperaturas acima de 180°C. Com isso, ocorre perda de umidade contida nos grânulos de amido e extinção de toda a estrutura celular do endosperma (Muralikrishna et al., 1986; Parker et al., 1999; Castro-Campos et al., 2021).

O formato, tamanho e cor dos grãos apresentam grande variabilidade dentro da espécie, influenciando diretamente sua aceitação comercial. Os grãos mais valorizados pelo mercado consumidor são os redondos, do tipo pérola, com endosperma alaranjado, devido à sua maior capacidade de expansão, melhor textura e sabor mais atrativo (Ceylan et al., 2002; Nguyen et al., 2024). No entanto, essa preferência pode variar conforme a região, sendo que alguns mercados podem demandar outros tipos de grãos. Quanto à comercialização, a classificação

de mercado inclui pipoca americana extra, pipoca americana especial, pipoca amarela extra e pipoca amarela especial, categorias que influenciam diretamente o preço e a escolha dos produtores (Zermeño-Campos et al., 2024). Além disso, características como o tipo de endosperma podem impactar a eficiência do processamento, tornando a seleção desses grãos um fator estratégico para a indústria da pipoca (Silva et al., 1993).

O milho-pipoca (*Zea mays everta*) tem origem nas primeiras formas domesticadas de milho na América, estando entre os tipos mais antigos e primitivos da espécie *Zea mays*. Vale destacar que, é confirmado que os povos indígenas das Américas utilizavam o milho-pipoca muito antes da chegada de Colombo ao continente (Long et al., 1989). Registros arqueológicos mostram que o milho-pipoca já era consumido por civilizações antigas há milhares de anos, encontrados em cavernas no Novo México (Zinsly e Machado, 1980; Long et al., 1989; Engels et al., 2006). Além disso, é sabido que a prática de aquecer e fazer estourar o milho era mais prevalente entre as tribos das regiões Central e Sul das Américas do que entre as tribos da América do Norte (Gama et al., 1990).

Sendo um alimento muito popular e apreciado no Brasil, sua produção ainda está concentrada em áreas limitadas, contudo haja boas expectativas de crescimento (Freitas Júnior et al., 2009; Amaral Júnior et al., 2013; Schwantes et al., 2018). A maior parte do milho-pipoca disponível no mercado é importado, principalmente devido à escassez de cultivares de alta qualidade e tecnologia avançada de produção (Amaral Junior et al., 2016; Schwantes et al., 2018).

Diferentemente do milho convencional, há um limitado número de cultivares de milho-pipoca oferecidos no mercado brasileiro (Silva, 2023). Do ponto de vista global, os Estados Unidos da América lideram como o principal produtor de pipoca, seguidos pelo Brasil, que, mesmo ocupando essa posição, ainda depende da importação para atender à demanda interna dos consumidores (Sangiovo et al., 2022; Silva, 2023).

A insuficiência na produção para atender à demanda interna decorre, em parte, da ausência de híbridos e variedades nacionais que possam combinar eficientemente alta produtividade com a qualidade desejada para a produção de pipoca em condições adversas (Vieira et al., 2017; Silva, 2023). No momento, o milho para produção de pipoca é essencialmente procurado por agricultores de

pequena escala, exceto por alguns poucos envolvidos em iniciativas comerciais ou que fazem uso de irrigação para assegurar o abastecimento (Cheim et al., 2021)

3.2 Condições ambientais e desafios para o cultivo de milho-pipoca

A água desempenha um papel crucial no crescimento das plantas, sendo essencial para diversos processos fisiológicos, incluindo a fotossíntese, o transporte e a absorção de nutrientes. Dessa forma, constitui um recurso indispensável para o desenvolvimento das plantas e sua importância remonta aos estágios da prática agrícola (Campos et al., 2021).

Em particular ao milho, o cultivo bem-sucedido depende das condições climáticas favoráveis, destacando-se a temperatura e a umidade do solo como elementos-chave para o adequado desenvolvimento das plantas (Souza et al., 2022).

As mudanças climáticas estão profundamente ligadas às ações humanas e aos modelos de desenvolvimento adotados ao longo do tempo (Fawzy et al., 2020). O uso intensivo dos recursos naturais, a expansão das áreas urbanas, a conversão de ecossistemas nativos em áreas agrícolas e o crescimento das atividades industriais têm provocado alterações significativas no equilíbrio ambiental (Zarei et al., 2021).

Essas mudanças refletem-se em padrões climáticos instáveis, com variações na temperatura, no regime de chuvas e na frequência de eventos extremos, como secas prolongadas e enchentes severas (Alpino et al., 2022). Desde 1880, a temperatura global vem aumentando, e os anos mais recentes são os mais quentes já registrados. Isso exige estudos para reduzir riscos à população e proteger direitos fundamentais, como a vida, a saúde e a alimentação (Alcântara et al., 2020).

As restrições hídricas decorrentes das alterações nas condições climáticas, sobretudo nas precipitações, têm o potencial de influenciar negativamente a produção agrícola em diversas localidades. Isso repercute na segurança alimentar em ambientes suscetíveis, como regiões áridas e semiáridas, gerando um grau de incerteza para o sistema agrícola (Barroso Neto et al., 2021).

Em particular ao Norte Fluminense, a região é tipicamente impactada por baixa quantidade de chuvas e por padrão irregular de distribuição pluviométrica, o

que aumenta os custos relacionados à irrigação para garantir o sucesso na produção agrícola principalmente em milho-pipoca (Kamphorst et al., 2021a; Lima et al., 2021). Isto posto, o desenvolvimento de cultivares com maiores capacidades adaptativas desponta-se como premente e, para tanto, o passo inicial é a seleção de formas genótípicas que possuam flexibilidade adaptativa para enfrentamento ao estresse hídrico. Porém, essa demanda não se restringe apenas ao âmbito regional, vez que há uma crescente necessidade de cultivares adaptadas a períodos de seca, a fim de atender à carência de opções de cultivos ambientalmente sustentáveis por parte dos agricultores (Silva et al., 2021).

3.3 Características para seleção de genótipos superiores em condição de limitação hídrica

Os Programas de Melhoramento de milho-pipoca possuem como objetivo principal o aumento da produtividade e da capacidade de expansão, sobretudo, de modo que haja ganhos em rendimento para o produtor e que a palatabilidade seja sedutora para o consumidor. Essas características são fortemente impactadas pela escassez de água no solo (Kamphorst et al., 2021a; Lima et al., 2021). Ressaltando-se que a tolerância ao déficit hídrico é uma expressão complexa do ponto de vista genético, por se tratar de uma expressão fenotípica que está associada a diversos aspectos da morfofisiologia da planta (Liu et al., 2011; Kamphorst et al., 2020; Oliveira et al., 2024; Lima et al., 2026) e, portanto, influenciada por mecanismos moleculares diversos, para além dos que interferem na produtividade e na capacidade de expansão (Schmitt et al., 2024).

O número de fileiras de grãos e o número de grãos por fileira são características agronômicas essenciais para selecionar genótipos de milho-pipoca adaptados ao déficit hídrico, pois estão fortemente associados ao potencial produtivo da espiga e à estabilidade da produção sob estresse (Kamphorst et al., 2021a; Leite et al., 2022; Oliveira et al., 2024). Além disso, a seleção de genótipos que mantêm altos valores dessas características sob déficit hídrico contribui para a obtenção de linhagens mais produtivas e eficientes no uso da água (Kamphorst et al., 2021a). O comprimento e o diâmetro da espiga apresentam-se como caracteres fundamentais na seleção de genótipos de milho-pipoca adaptados ao estresse hídrico, por estarem diretamente associados à produtividade e à capacidade

fisiológica das plantas de manter o desenvolvimento reprodutivo sob condições de déficit hídrico (Oliveira et al., 2024).

O índice de clorofila é reportado como positivamente relacionado à produtividade do milho (Fornari et al., 2020); por sua vez, a senescência foliar tardia e os níveis mais altos de clorofila estão associados ao incremento na produção de grãos em híbridos de milho. Assim, genótipos que mantêm níveis elevados de pigmentação verde em suas folhas, especialmente sob condições adversas, tornam-se de grande interesse para serem utilizados em programas de melhoramento genético (Chibane et al., 2021).

Pigmentos foliares, tais como a clorofila e os carotenoides, têm uma importância fundamental na aclimação dos genótipos de milho-pipoca a estresses abióticos (Kamphorst et al., 2021b; Bispo et al., 2024). Esses pigmentos podem indicar a capacidade da planta de enfrentar e de se recuperar de condições adversas do ambiente (Murchie e Niyogi, 2011). A presença destes pigmentos e suas quantidades podem indicar a capacidade da planta em absorver e aproveitar a luz solar de maneira eficaz, o que é essencial para o seu crescimento e desenvolvimento em condições adversas (Hawkins et al., 2014). Isto posto, ao selecionar genótipos de milho-pipoca para resistir a estresses abióticos, é crucial considerar não apenas a produtividade e a qualidade dos grãos, mas também a capacidade da planta em manter níveis adequados de pigmentos foliares.

O sincronismo entre o florescimento masculino e feminino é essencial em condições de estresse hídrico para garantir a fertilização adequada em plantas de milho-pipoca (Kamphorst et al., 2021b). Genótipos que mantêm essa sincronização mesmo sob condições de seca podem ser mais adaptados e produtivos. Além disso, a capacidade de manter o florescimento feminino durante períodos secos indica atuação de mecanismos de resistência ao estresse hídrico, como a persistência dos estigmas receptivos ou a capacidade de retomar o florescimento após a seca (Kamphorst et al., 2021b; Santos et al., 2021). Em conclusão, optar por um intervalo reduzido entre os momentos de florescimento masculino e feminino em meio a condições controladas de estresse hídrico durante o florescimento, representa uma abordagem eficiente e rápida para alcançar rendimentos de grãos mais elevados e consistentes no cultivo de milho (Durães et al., 1998).

Em condição de cultivo sob déficit hídrico, o rendimento de grãos é a característica principal para inferir sobre o grau de tolerância ao estresse hídrico e/ou eficiência no uso da água em milho-pipoca (Kamphorst et al., 2018; Kamphorst et al., 2020; Kamphorst et al., 2021a; Leite et al., 2022). Todavia, algumas características secundárias associadas com a adaptação à escassez de água no solo vêm sendo averiguadas, no intento de se praticar seleção indireta por meio de variável de fácil acesso e menos influenciada pelo ambiente (Kamphorst et al., 2019; Kamphorst et al., 2020; Kamphorst et al., 2021b; Leite et al., 2021; Leite et al., 2022).

Em milho comum, alguns caracteres secundários com elevada herdabilidade vêm sendo estudados com o objetivo de averiguar a magnitude de associação com a produtividade de grãos (Ali et al., 2017), podendo-se citar: intervalo entre florescimento masculino e feminino, índice de pigmentos foliares, diâmetro do colmo e *stay-green* (Li et al., 2016). O índice de verde da folha (LAI) desempenha um papel crucial na avaliação do estado fisiológico e desenvolvimento das plantas de milho-pipoca. Sua determinação se baseia na reflexão da luz verde pelas folhas e é diretamente correlacionada à presença de clorofila nos tecidos foliares. Quanto mais elevado o valor de LAI, maior a área foliar e, conseqüentemente, maior a quantidade de clorofila, indicando um aumento fotossintético potencial e, conseqüentemente, uma "saúde" mais robusta das plantas (Manfron et al., 2003).

Nesse aspecto, o índice de verde da folha emerge como uma possibilidade para a discriminação de genótipos superiores em condições de seca, fornecendo informações importantes sobre o estado nutricional, dentre outros estresses que possam afetar a cultura em questão.

Sob essa égide, Kamphorst et al. (2021b) utilizaram de tecnologias de fenotipagem digital para inferir sobre a senescência foliar em milho-pipoca com base em características espectrais das folhas. Os autores utilizaram um medidor portátil de clorofila (SPAD) e um dispositivo para calcular o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), no intento de identificar a perspectiva destas avaliações tornarem-se opções de estimativas indiretas da produtividade de grãos, considerando que a permanência dos pigmentos foliares pode impactar positivamente a produtividade. Em conclusão foi prescrito que o índice de verde via SPAD exibiu elevada correlação com volume de grãos expandidos por hectare,

devendo aquele ser avaliado como opção para a seleção indireta de genótipos com adaptação ao déficit hídrico em programas de melhoramento.

Características como capacidade de expansão, número de grãos por fileira, comprimento de espiga e rendimento de grãos se mostraram mais relevantes para a definição de estratégias de melhoramento do milho-pipoca (Lima et al., 2019). Características como rendimento de grãos, número de grãos por linha, comprimento e diâmetro de espiga e massa de cem grãos apresentaram maior relevância no contexto do melhoramento do milho-pipoca, configurando-se como parâmetros agrônômicos consistentes e informativos para a avaliação da *performance* genotípica nas condições estudadas. (Kamphorst et al., 2021a).

Isto posto, crê-se que há uma potencialidade quanto à perspectiva de seleção indireta para tolerância à seca em milho-pipoca, o que suscita a implementação de novos estudos com propósitos consentâneos que possam gerar conclusões científicas seguras para com a fidedigna utilização dessa estratégia.

3.4 Melhoramento genético para tolerância ao estresse hídrico em milho-pipoca

Desde 1998 o Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal (LMGV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) desenvolve um Programa de Melhoramento Genético para o milho-pipoca. O programa, inicialmente buscou na seleção recorrente intrapopulacional (SRI) a obtenção de população melhorada de UNB-2U, que passou a ser designada UENF14 a partir do sexto ciclo, momento em que ocorreu o registro no MAPA da nova cultivar e o consequente lançamento aos produtores (Amaral Júnior et al., 2010).

Paralelamente, o programa gerou linhagens de germoplasma obtido do CIMMYT, as quais foram utilizadas em estudos clássicos de *testcrosses* no intento de gerar híbridos simples superiores (Almeida et al., 2024). Em sua trajetória, o programa derivou estudos com estresses abióticos, iniciando pela compreensão da eficiência no uso do fósforo e, também, pela busca de híbridos superiores, o mesmo ocorrendo com deficiência de nitrogênio e de água no solo. Hodiernamente, a busca por genótipos adaptados a condições estressantes tem sido incessante, mormente ao déficit hídrico, sobretudo pela motivação de mudanças climáticas, que vêm cada vez mais impactando os cultivos.

Em específico ao estresse hídrico, em 2015, o Programa de Melhoramento de Milho-Pipoca da UENF começou a realizar pesquisas com o objetivo de encontrar genótipos de milho-pipoca com distinta eficiência no uso da água e elevada tolerância ao estresse hídrico. Esses estudos foram motivados pela frequência e intensidade das secas nas regiões Norte e Noroeste do estado do Rio de Janeiro (Oliveira-Júnior et al., 2018).

O primeiro trabalho desenvolvido nesta linha de pesquisa envolveu a caracterização de vinte linhagens S₇ do milho-pipoca, com foco na avaliação de sua capacidade de tolerância e eficiência no uso da água. Para isso, experimentos foram realizados em campo sob duas condições hídricas; quais sejam, com déficit hídrico e com irrigação em capacidade de campo (Kamphorst et al., 2018). O experimento examinou o potencial de produção das linhagens, incluindo o rendimento de grãos e seus aspectos de produção, juntamente com a capacidade de expansão dos grãos.

Para tanto, vinte e duas características foram avaliadas, incluindo aspectos morfoagronômicos, fisiológicos e radiculares e, destas, buscadas associação às características principais - rendimento de grãos e capacidade de expansão - no intento de identificar associação de características secundárias com as principais e que favoreçam a seleção indireta precoce, bem como a identificação rápida de genótipos tolerantes à seca e/ou eficientes no uso da água por meio de características de fácil quantificação e elevada herdabilidade (Kamphorst et al., 2018).

Buscando compreender os mecanismos genéticos relacionados à tolerância à seca e à eficiência no uso da água, Lima et al. (2019) avaliaram oito genitores e vinte e oito híbridos, por meio de um dialelo de Hayman, em ambientes com diferentes disponibilidades hídricas. Os autores identificaram dominância completa para a capacidade de expansão (CE) sob ambas as condições. Além disso, para o rendimento de grãos e características correlatas, como número de grãos por fileira e comprimento de espiga, os efeitos de dominância também prevaleceram, evidenciando o potencial da heterose como estratégia para o melhoramento da cultura sob estresse hídrico.

Posteriormente, Kamphorst et al. (2021a) investigaram a viabilidade de utilizar características secundárias associadas à produtividade como critérios para a seleção indireta de genótipos tolerantes à baixa disponibilidade de água no solo.

Os resultados indicaram que o aumento no número de grãos por fileira, no diâmetro e no comprimento da espiga, bem como maiores valores de índice de verde (via SPAD), estão positivamente correlacionados com a produtividade. Esses achados reforçam o potencial da seleção indireta de genótipos mais produtivos com base em características de fácil mensuração, não destrutivas e obtidas em menor tempo (Kamphorst et al., 2021a,b).

Santos et al. (2021) conduziram a avaliação de quinze variedades de polinização aberta (VPAs) latino-americanas de milho-pipoca em condições de campo, sob dois regimes hídricos: bem irrigado e com estresse hídrico. O objetivo foi identificar genótipos promissores para ambientes com ocorrência de seca e apontar características discriminantes úteis na avaliação da tolerância à deficiência hídrica. A ampla variabilidade genética observada entre as populações avaliadas destacou o potencial do germoplasma avaliado para o desenvolvimento de novas linhagens com maior tolerância à seca e/ou eficiência no uso da água, contribuindo significativamente para programas de melhoramento voltados à resistência climática.

Em busca de novas fontes genéticas para tolerância à seca e eficiência no uso da água, Leite et al. (2022) avaliaram quarenta linhagens latino-americanas de milho-pipoca do Banco de Germoplasma da UENF, sob duas condições hídricas contrastantes, nas safras de 2020 e 2021. Apesar das reduções significativas na expressão de caracteres agrônômicos, alguns genótipos mostraram maior adaptação ao déficit hídrico, destacando-se como potenciais fontes de tolerância à seca. O estudo também ressaltou a importância de caracteres secundários na seleção, especialmente o índice de verde (via SPAD), que se mostrou um marcador fenotípico eficiente, permitindo avaliações mais rápidas em campo. Os resultados evidenciam a necessidade de estratégias de melhoramento específicas para diferentes níveis de disponibilidade hídrica.

Carvalho et al. (2023) avaliaram quarenta e cinco híbridos F_1 obtidos a partir de cruzamentos dialélicos entre dez linhagens S_7 de milho-pipoca, previamente selecionadas de um grupo de vinte linhagens testadas em campo sob estresse hídrico. Dentre as selecionadas, quatro apresentaram eficiência agrônômica no uso da água. Os resultados indicam que o melhoramento voltado à adaptação ao déficit hídrico nas fases iniciais do desenvolvimento do milho-pipoca tende a ser mais eficiente com o uso de híbridos, devido à predominância de efeitos genéticos de

dominância no controle de características das plântulas, especialmente aquelas relacionadas ao sistema radicular e parte aérea.

Schmitt et al. (2024), por sua vez, compararam duas linhagens de milho-pipoca, L71 (tolerante) e L61 (sensível à seca), cultivadas em perlita e turfa sob irrigação total e estresse hídrico (45,00% da capacidade do lisímetro por dez dias), visando entender os mecanismos de adaptação durante a floração. Percebeu-se que L71 manteve maior biomassa seca e menor degradação da clorofila, enquanto L61 apresentou sinais acentuados de senescência. Diferenças em trocas gasosas foram observadas apenas sob estresse. Foram identificadas 1.838 proteínas, sendo 169 diferencialmente acumuladas em L71 e 386 em L61, com destaque para vias relacionadas à fotossíntese, metabolismo energético e resposta ao estresse oxidativo, tendo sido revelados importantes mecanismos proteômicos associados à tolerância à seca.

Em seguimento a investigações com a linha de pesquisa, Oliveira et al. (2024) avaliaram os efeitos da inoculação com *Bacillus cereus* em plantas de milho-pipoca submetidas a condições de déficit hídrico. Os autores observaram que a bactéria contribuiu significativamente para o crescimento radicular e para a manutenção de processos fisiológicos essenciais durante o estresse, favorecendo a adaptação da planta à escassez de água. Os resultados indicam que a associação com microrganismos benéficos, como *B. cereus*, pode ser uma estratégia promissora para complementar programas de melhoramento voltados à tolerância à seca em milho-pipoca.

Inobstante, Lamêgo et al. (2024) avaliaram os efeitos genéticos de características morfofisiológicas em milho-pipoca cultivado sob regimes hídricos contrastantes, com o objetivo de identificar atributos associados à tolerância ao déficit hídrico. O estudo foi conduzido com quatro linhagens S₇, oriundos de cruzamentos dialélicos, avaliados em condições de irrigação plena e de estresse hídrico. Os resultados revelaram que características como índice de área foliar, taxa fotossintética e condutância estomática são influenciadas por efeitos genéticos aditivos e não-aditivos, com destaque para o predomínio de efeitos dominantes em condições de estresse.

Apesar dos avanços dessa linha de pesquisa, que é pioneira no Brasil, ainda há uma necessidade significativa de estudos voltados à prospecção de novas fontes de tolerância ao déficit hídrico em milho-pipoca. Atualmente, são raros os

materiais registrados com recomendação específica para tolerância à seca, o que evidencia a importância de pesquisas que explorem esse tema. Isso porque, apenas o híbrido WS01, desenvolvido por Lima et al. (2021), possui recomendação para tolerância à seca.

Ademais, de acordo com as informações disponíveis, a oferta de sementes de cultivares melhoradas de milho-pipoca no Brasil é limitada, especialmente quando comparada ao milho convencional. Embora haja esforços de instituições públicas, como o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) para desenvolver novas cultivares, a participação dessas instituições no mercado de sementes de milho-pipoca ainda é limitada. Portanto, existe uma necessidade contínua de desenvolver genótipos mais tolerantes ao estresse hídrico, bem como ampliar a diversidade genética disponível para a produção de híbridos adaptados a diferentes condições ambientais.

A identificação e a seleção de genótipos adaptados ao estresse hídrico são fundamentais para ampliar a base genética disponível e melhorar o desempenho da cultura em condições adversas. Estudos como este que ora está sendo apresentado são estratégicos para subsidiar programas de melhoramento genético, contribuindo para o desenvolvimento de híbridos mais resistentes, aumentando a sustentabilidade da produção e fortalecendo a competitividade do setor sementeiro nacional.

3.5 Análise GT *Biplot*

A análise GT *Biplot* é uma técnica estatística multivariada que permite visualizar e interpretar, de forma simultânea, o desempenho de diferentes genótipos em relação a múltiplas características, facilitando a seleção no contexto do melhoramento genético (Yan, 2014). Trata-se de uma ferramenta gráfica que representa, em um único plano, tanto os genótipos quanto as variáveis avaliadas, permitindo a análise conjunta e intuitiva das interações entre eles (Yan e Frégeau-Reid, 2018). Uma das principais vantagens do GT *Biplot* é a sua capacidade de identificar genótipos superiores em diversas características ao mesmo tempo, o que otimiza o processo de seleção de genótipos em programas de melhoramento.

Originalmente proposto por Gabriel (1971) como uma técnica de representação gráfica baseada na análise de componentes principais, o *Biplot* projeta dados de tabelas bidimensionais, como genótipos e variáveis, com base no produto e no ângulo entre vetores (Yan e Kang, 2002).

A análise também evidencia a correlação entre variáveis, por meio do ângulo entre os vetores, e revela a contribuição de cada característica na diferenciação dos genótipos. Por sua abordagem visual e integrativa, é uma ferramenta valiosa para auxiliar os melhoristas nas tomadas de decisões mais rápidas e precisas no processo de seleção de genótipos (Yan e Frégeau-Reid, 2018).

Trata-se, pois, de uma ferramenta estatística multivariada de grande relevância para o melhoramento genético vegetal, permitindo a visualização conjunta de genótipos e características em um único gráfico. Essa abordagem favorece a análise simultânea de múltiplos caracteres, auxiliando na identificação de genótipos superiores.

Estudos como o de Santos et al. (2021) demonstraram que a análise GT *Biplot* é uma ferramenta poderosa para a identificação de genótipos superiores, permitindo a visualização simultânea das relações entre genótipos em diferentes condições ambientais, como irrigação plena e déficit hídrico. Essa abordagem mostrou-se especialmente útil na seleção de genótipos de milho-pipoca com bom desempenho em cenários contrastantes de disponibilidade hídrica, otimizando a tomada de decisão em programas de melhoramento voltados à tolerância à seca.

De forma complementar, Lima et al. (2023) evidenciaram, por meio da análise GGE *Biplot*, a eficiência da técnica multivariada na identificação de híbridos de milho com alto rendimento, estabilidade e ampla adaptabilidade em múltiplos ambientes.

Juntos, esses estudos reforçam o valor da análise GT/GGE *Biplot* como uma ferramenta estatística exequivelmente robusta para apoiar a seleção e a recomendação de genótipos adaptados tanto a condições específicas quanto a uma ampla gama de ambientes, contribuindo significativamente para o avanço de programas de melhoramento genético.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material vegetal

Foram utilizadas 40 linhagens S₇ de milho-pipoca provenientes do Banco de Germoplasma da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), derivadas de cultivares adaptadas aos climas temperado e tropical de países de América do Sul.

Tabela 1. Descrição das linhagens de milho-pipoca, com informações sobre ancestralidade, origem e adaptação climática.

Genótipo	Genealogia	País de origem	Instituição	Adaptação climática
L203	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L204	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L217	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L220	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L263	PARA 172	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L273	PARA 172	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L291	URUG 298	Uruguai	CIMMYT	Temperada
L292	URUG 298	Uruguai	CIMMYT	Temperada
L294	URUG 298	Uruguai	CIMMYT	Temperada
L321	BARÃO DE VIÇOSA	Brasil	UFV	Tropical

Tabela 1
. Cont.

Genótipo	Genealogia	País de origem	Instituição	Adaptação climática
L324	BARÃO DE VIÇOSA	Brasil	UFV	Tropical
L332	BARÃO DE VIÇOSA	Brasil	UFV	Tropical
L358	PR 023	Brasil	UEM	Tropical
L366	PR 023	Brasil	UEM	Tropical
L381	SAM	Brasil	UEM	Temperada
L382	SAM	Brasil	UEM	Temperada
L386	SAM	Brasil	UEM	Temperada
L391	SAM	Brasil	UEM	Temperada
L394	SAM	Brasil	UEM	Tropical
L472	SE 013	Brasil	UEM	Tropical
L501	PA 170 ROXO	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L507	PA 170 ROXO	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L509	PA 170 ROXO	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L652	ARZM 13 050	Argentina	CIMMYT	Temperada
L655	ARZM 13 050	Argentina	CIMMYT	Temperada
L684	UENF 14	Brasil	UENF	Tropical
L688	UENF 14	Brasil	UENF	Tropical
L690	UENF 14	Brasil	UENF	Tropical
L691	UENF 14	Brasil	UENF	Tropical
L693	UENF 14	Brasil	UENF	Tropical
L61	BRS-Ângela	Brasil	EMBRAPA	Tropical
L63	BRS-Ângela	Brasil	EMBRAPA	Tropical
L65	BRS-Ângela	Brasil	EMBRAPA	Tropical
L71	BRS-Ângela	Brasil	EMBRAPA	Tropical
L75	Viçosa	Brasil	UVF	Tropical
L76	Viçosa	Brasil	UVF	Tropical
P2	Composto CMS-42	Brasil	UVF	Tropical
P3	Composto CMS-42	Brasil	UVF	Tropical
P4	SAM	Brasil	UEM	Tropical
P6	Híbrido Zaeli	Brasil	UEM	Tropical
P7	Híbrido Zaeli	Brasil	UEM	Tropical
P8	Híbrido IAC 112	Brasil	IAC	Tropical

CIMMYT - Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo; Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; IAC - Instituto Agrônomo; UEM - Universidade Estadual de Maringá; UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; e UFF - Universidade Federal de Viçosa.

4.2 Condições experimentais

O experimento foi realizado no Colégio Estadual Agrícola Antônio Sarlo, localizado em Campos dos Goytacazes – RJ, no Norte Fluminense, em uma única época de cultivo. Os diferentes genótipos foram cultivados em dois ambientes com condições hídricas contrastantes, designados como: i) regime bem irrigado (WW – do inglês de *well-watered*), que foi mantido a 100% da capacidade de campo; ii) com estresse hídrico (WS – do inglês de *water-stressed*), em que foi disponibilizada 68,50% de água da capacidade de campo. O corte da irrigação ocorreu 12 dias antes da antese masculina até a maturação fisiológica.

O local conta com uma estação meteorológica automática, responsável pelo registro das variáveis micrometeorológicas. Ao longo do experimento, a temperatura média foi de 23,10°C, a umidade relativa média foi de 77,20% e a radiação fotossinteticamente ativa foi de 1.600 KJ/m² (Figura 1).

A área de cultivo foi preparada previamente com gradagem e sulcamento, seguido pela aplicação de adubação de base, considerando recomendações gerais para a cultura. Posteriormente, realizou-se a semeadura utilizando de três sementes por cova. Após vinte e um dias da emergência, ocorreu o desbaste, mantendo-se apenas uma planta por cova.

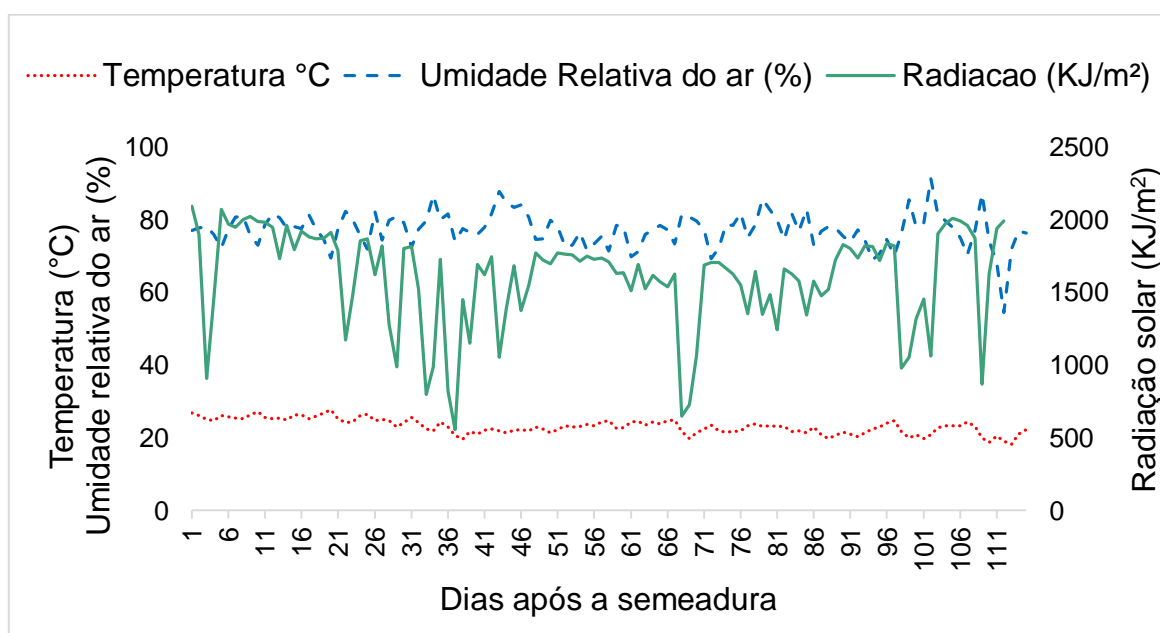


Figura 1. Condições ambientais (umidade relativa, radiação fotossinteticamente ativa e temperatura média) registradas durante a realização do experimento com o cultivo de quarenta linhagens de milho-pipoca durante os meses de abril a agosto de 2024.

O delineamento experimental adotado foi blocos completos casualizados com três repetições. Cada unidade experimental foi constituída por parcelas de 4,60 m de comprimento, com espaçamento de 0,20 m entre plantas e 0,80 m entre linhas, resultando em um total de 23 plantas por parcela (62.500 plantas ha⁻¹).

O plantio foi realizado em abril do ano de 2024. A adubação de base dos experimentos foi realizada com 30 kg ha⁻¹ de N (na forma de ureia), 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo) e 60 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio). A adubação de cobertura ocorreu 30 dias após semeadura, disponibilizando-se 100 kg ha⁻¹ de N (na forma de ureia).

A Tabela 2 apresenta o volume de água aplicado durante o período experimental, sob condições de irrigação plena e de déficit hídrico, em função dos dias após a semeadura. A irrigação foi realizada por meio de um sistema de gotejamento, com um gotejador instalado para cada planta, de acordo com o espaçamento adotado. Para indução do estresse hídrico, a irrigação foi interrompida 12 dias antes do florescimento masculino no ambiente WS, persistindo até a maturação fisiológica. O sistema contava com hidrômetros, assegurando a precisão no controle do volume de água fornecido a cada ambiente para o alcance de preciso controle da quantidade de água aplicada às plantas.

Tabela 2. Quantidade de água (mm) aplicada no solo em cultivos de linhagens de milho-pipoca com e sem déficit hídrico, considerando-se os dias após a semeadura.

Dias após semeadura	Precipitação (mm)	Quantidade de água (mm)			
		Irrigação plena (WW)		Estresse hídrico (WS)	
		Aplicada (m ³)	Total	Aplicada (m ³)	Total
1	0,20	0,00	0,20	0,00	0,20
7	0,00	2,07	2,07	2,16	2,16
21	1,20	6,58	7,78	6,72	7,92
28	0,40	5,69	6,09	5,76	6,16
35	0,20	6,65	6,85	6,97	7,17
42	0,40	3,07	3,47	3,26	3,66
49	10,10	1,64	11,74	1,63	11,73
56	0,60	9,13	9,73	9,22	9,82
63	0,40	12,24	12,64	3,13	3,53
70	0,00	9,04	9,04	0,00	0,00
77	0,40	8,56	8,96	0,00	0,40
84	0,00	6,72	6,72	0,00	0,00
91	0,40	3,14	3,54	5,52	5,92
98	8,20	2,72	10,92	0,10	8,30
105	2,28	0,00	2,28	0,00	2,28
112	2,70	0,00	2,70	0,00	2,70
Total	27,48	77,25	104,3	44,47	71,5

Durante a execução dos experimentos, o potencial hídrico do solo foi monitorado por meio de sensores Decagon MPS-6 (Decagon, Pullman, Washington, EUA), os quais foram instalados entre duas plantas localizadas na linha de plantio e a uma profundidade de 0,20 m. Na condição WW as plantas receberam irrigação plena e o solo ficou próximo à capacidade de campo do solo (-0,01 MPa) enquanto que na condição WS, o solo atingiu o ponto de murcha permanente (-1,5 MPa). No 91º dia após a semeadura, efetuou-se uma irrigação suplementar de salvamento devido à intensidade do déficit hídrico, o qual apresentava risco de inviabilizar a continuidade do experimento.

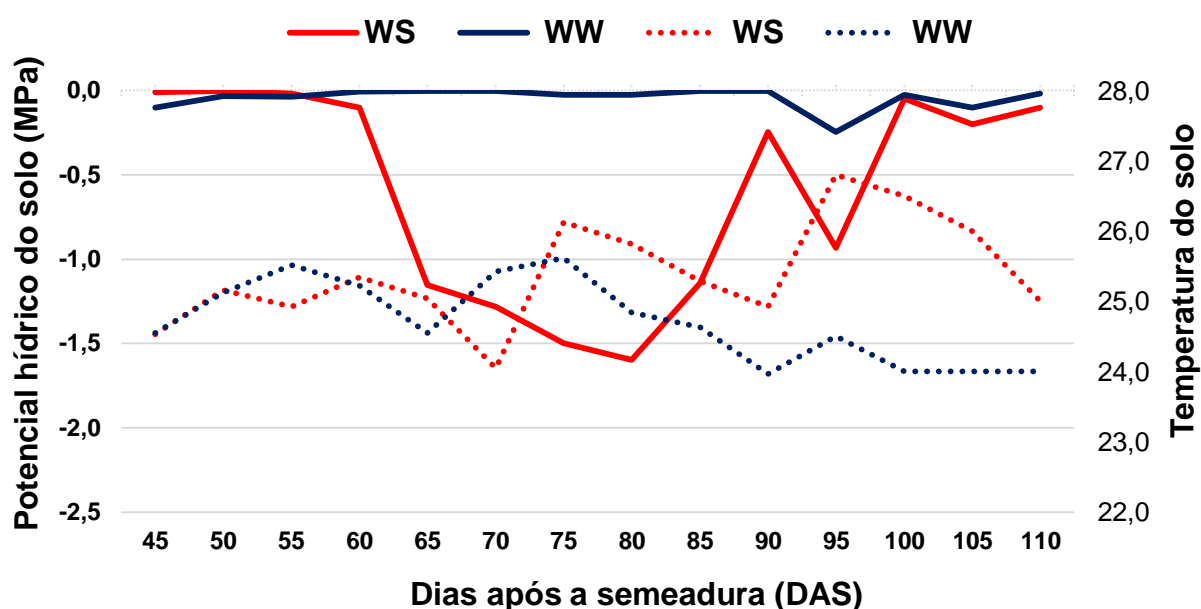


Figura 2. Potencial hídrico do solo (-MPa) nos ambientes com irrigação plena (WW) e sob déficit hídrico (WS), durante a suspensão da irrigação. A suspensão da irrigação ocorreu em 12 dias antes da antese masculina, 55 dias após a semeadura e o solo atingiu o ponto de murcha permanente (-1,5 MPa) aos 75 dias após a semeadura. Temperatura do solo nos ambientes com irrigação plena (WW) e sob estresse hídrico durante a suspensão da irrigação.

4.3 Características avaliadas

No total, foram avaliadas quinze características relacionadas à morfologia e à fisiologia das plantas nas duas condições hídricas, as quais estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Descrição de dezesseis características avaliadas em quarenta linhagens de milho-pipoca do Banco de Germoplasma da UENF cultivadas sob condições hídricas contrastantes.

Características	Sigla	Unidade
Características morfológicas		
Altura de espiga	AE	m
Altura de planta	AP	m
Diâmetro de espiga	DESP	m
Comprimento de espiga	CESP	m
Características agronômicas		
Número de fileiras de grãos por espiga	NFG	Unid.
Número de grãos por fileira	NGF	Unid.
Massa de cem grãos	MCG	g
Rendimento de grãos	RG	Kg ha ⁻¹
Capacidade de expansão	CE	mL g ⁻¹
Características fisiológicas		
Conteúdo foliar de clorofila	CHL	µg cm ⁻²
Conteúdo foliar de flavonoides	FLAV	µg cm ⁻²
Conteúdo foliar de antocianina	ANTH	µg cm ⁻²
Índice do balanço de nitrogênio	NBI	Índice
Índice de tolerância ao estresse hídrico	STI	Índice
Eficiência agronômica no uso da água em WS	WUEWS	kg/m ³
Eficiência agronômica no uso da água em WW	WUEWW	kg/m ³

4.3.1 Características morfológicas

Foram examinadas a altura de planta (AP, cm) e da espiga (AE, cm), ambas tomadas após o pendoamento. A altura das plantas foi medida desde o solo até a folha bandeira, enquanto a altura da espiga foi medida até a inserção da primeira folha principal. Também foram avaliadas características agronômicas secundárias, como diâmetro de espiga (DESP, cm) e comprimento de espiga (CESP, cm) ambas mensuradas imediatamente no terço médio da espiga, utilizando um paquímetro digital, em uma amostra composta por cinco plantas por parcela.

4.3.2 Características agronômicas

Foram avaliados os seguintes atributos: número de fileiras de grãos na espiga (NFG), número de grãos por fileira (NGF), massa de cem grãos (MCG, g), rendimento de grãos (RG, kg ha⁻¹) e capacidade de expansão (CE, mL g⁻¹).

4.3.3 Mensuração do teor relativo de clorofila e pigmentos foliares

Foi empregado o instrumento de medição de pigmentos foliares denominado DUALEX (DUALEX® SCIENTIFIC), para quantificar os índices de clorofila (CHL, µg/cm²), antocianinas (ANTH, µg/cm²), flavonoides (FLAV, µg/cm²) e o índice de balanço de nitrogênio (NBI) nas folhas. Sendo realizadas três aferições por linhagens.

4.3.4 Estimativa da tolerância à seca e eficiência no uso da água

Ao estimar a tolerância e eficiência no uso da água, foram utilizadas as médias dos caracteres para a *i*-ésima linhagem (Y_i) em ambas as condições hídricas, identificadas como WS e WW, no cálculo dos índices. A média geral dos caracteres em cada ambiente foi representada por \bar{Y} . Os índices de seleção estimados foram:

- Índice de tolerância ao estresse hídrico (Fernandez, 1992): $STI_i = Y_{WWi} \times Y_{WSi} / \bar{Y}_{WW}^2$;
- Eficiência agrônômica no uso da água sob WS: $WUE_{ws} = Y_{WSi} / L_{WS}$, em que **L** representa os litros de água (precipitação + irrigação); e
- Eficiência agrônômica no uso da água sob WW: $WUE_{ww} = Y_{WWi} / L_{WW}$, em que **L** representa os litros de água (precipitação + irrigação).

4.4 Análises estatísticas

4.4.1 Análise de variância

A análise de variância individual foi implementada seguindo o modelo estatístico: $Y_{ij} = \mu + g_i + b_j + \varepsilon_{ij}$, em que Y_{ij} : valor observado do *i*-ésimo genótipo no *j*-ésimo bloco; μ : constante geral; g_i : efeito fixo atribuído ao *i*-ésimo genótipo; b_j : efeito do bloco *j*; e ε_{ij} : erro aleatório associado à observação Y_{ij} .

Em seguida, foi realizada a análise de variância conjunta dos ambientes para avaliar as discrepâncias entre os genótipos em ambiente WW e WS, de acordo com o seguinte modelo estatístico: $Y_{ijk} = \mu + G_i + B/A_{jk} + A_j + GA_{ij} + \varepsilon_{ijk}$, considerando-se Y_{ijk} : observação do i -ésimo genótipo no j -ésimo ambiente no k -ésimo bloco; μ : constante geral; G_i : efeito fixo do i -ésimo genótipo; B/A_{jk} : efeito do k -ésimo bloco dentro do ambiente j ; A_j : efeito fixo do j -ésimo ambiente; GA_{ij} : efeito fixo da interação entre o i -ésimo genótipo com o j -ésimo ambiente; e ε_{ijk} : erro aleatório experimental médio associado à observação Y_{ijk} .

4.4.2 Análise GT *Biplot*

A análise GT *Biplot*, conforme proposta por Yan e Rajcan (2002) e Yan e Kang (2023), foi aplicada exclusivamente às características AE, AP, DESP, CESP, NFG, NGF, MCG, RG, CE, CHL, FLAV, ANTH, NBI, STI, WUEws e WUEww. O modelo utilizado na análise multivariada aplicada ao *Biplot* genótipos x características (GT *Biplot*) foi:

$$\frac{T_{ij} - \bar{T}_{ij}}{S_j} = \lambda_1 \zeta_{i1} T_{j1} + \lambda_2 \zeta_{i2} T_{j2} + \varepsilon_{ij}$$

em que: T_{ij} é o valor médio do genótipo i para a característica j ; \bar{T}_{ij} representa a média de todos os genótipos na característica j ; S_j é a estimativa de desvio-padrão; λ_1 e λ_2 representam os valores singulares para PC1 e PC2, respectivamente; ζ_{i1} e ζ_{i2} representam os scores da PC1 e PC2 para o genótipo i ; T_{j1} e T_{j2} representam os scores da PC1 e PC2 para a característica j ; ε_{ij} é o resíduo do modelo associado à *performance* do genótipo e da característica. Para a elaboração do gráfico GT *Biplot*, utilizou-se o software RStudio (R CoreTeam, 2025).

4.4.3 Agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott

Considerando o objetivo de examinar todas as combinações e a *performance* dos genótipos diante do déficit hídrico, as médias dos tratamentos foram contrastadas utilizando o critério de Scott-Knott, no nível de significância de 5%, por meio do auxílio do *software* Genes (Cruz, 2013).

4.4.4 Estimativas do coeficiente de correlação de Pearson

As estimativas do coeficiente de correlação de Pearson (1920) foram empregadas para estimar a intensidade e a direção da associação linear entre características morfoagronômicas e fisiológicas dos genótipos de milho-pipoca avaliados sob diferentes condições hídricas, utilizando o *software* RStudio (R CoreTeam, 2025), com base na correlação fenotípica entre caracteres.

4.4.5 Diversidade entre acessos

Para tanto utilizou-se a medida de distância Euclidiana Média Padronizada e o método de agrupamento de Ward (Cruz et al., 2012).

Para o cálculo da matriz de distância Euclidiana, a média estimada para cada índice foi padronizada, por meio da expressão: $z_{ik} = (X_{ik} - \bar{X}_i) / \sigma_k$; em que X_{ik} corresponde à média do i -ésimo tratamento para o k -ésimo índice e σ_k corresponde ao desvio-padrão do k -ésimo índice. Para calcular a matriz de distância foi utilizada a distância Euclidiana seguindo a inferência: $d_{ii'} = \sqrt{\frac{1}{v} \sum_{k=1}^v (z_{ik} - z_{i'k})^2}$, em que v é o número de características estudadas.

O algoritmo de Ward é expresso por:

$$SQD_{ii'} = \frac{1}{2} d_{ii'}^2$$

em que:

$$SQS_{ii'} = \sum_{j=1}^n SQD_{j(ii')}$$

Sendo $SQD_{j(ii')}$ a soma de quadrados dos desvios, para a j -ésima variável, considerando os acessos i e i' .

e

$$d_{ii'}^2 = \sum_{j=1}^n (X_{ij} - X_{i'j})^2$$

em que:

$d_{ii'}^2$: quadrado da distância euclidiana entre os genótipos i e i' ;

n : número de caracteres avaliados; e

X_{ij} : valor do caráter j para o genótipo i .

A soma de quadrados dos desvios total é dada por:

$$SQDTotal = \frac{1}{g} \sum_{i < i'}^g \sum_{i'}^g d_{ii'}^2$$

sendo que g é o número de acessos.

Nesta análise de agrupamento, identifica-se, na matriz D (cujos elementos são os quadrados das distâncias euclidianas - $d_{ii'}^2$) ou na matriz S (cujos elementos são as somas dos quadrados dos desvios - $SQD_{jii'}$), o par de acessos que proporciona menor soma de quadrados dos desvios. Com esses acessos agrupados, uma nova matriz de dissimilaridade, de menor dimensão, é recalculada, considerando que:

$$SQD_{(ijk)} = \frac{1}{k} d_{(ijk)}^2 \text{ (k é o número de acessos no grupo, que neste caso é igual a 3).}$$

$$d_{(ijk)}^2 = d_{ij}^2 + d_{(ijk)}^2 = d_{ij}^2 + d_{ik}^2 + d_{jk}^2$$

e ainda que:

$$SQD_{(ijkm)} = \frac{1}{k} d_{(ijkm)}^2 \text{ (k é o número de acessos no grupo, que neste caso é igual a 4).}$$

$$d_{(ijkm)}^2 = d_{ij}^2 + d_{ik}^2 + d_{jk}^2 + d_{im}^2 + d_{jm}^2 + d_{km}^2$$

e assim sucessivamente.

No procedimento, realiza-se a análise, fornecendo os g-1 (g é o número de genótipos a serem agrupados) passos de agrupamento para que seja formado o dendrograma (Cosme et al., 2014).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise de variância individual e conjunta em características morfoagronômicas e fisiológicas

Em se tratando das avaliações morfoagronômicas, a análise de variância individual demonstrou diferença significativa ($p < 0,01$) para todas as características avaliadas em ambas as condições hídricas (CHs) (Tabela 4), indicando que os genótipos responderam de maneira distinta sob diferentes níveis de disponibilidade de água. Além disso, cumpre destacar que o coeficiente de variação experimental (CVe%), com exceção da característica RG, apresentou valores inferiores a 18,00% para todas as variáveis avaliadas, indicando bom controle experimental e confiabilidade dos dados obtidos.

Tabela 4. Resumo da análise de variância conjunta e individual, das estimativas das médias e dos desvios-padrão de nove características morfoagronômicas avaliadas em quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas sob condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada).

Caraterísticas		WS			WW			Análise conjunta		
		Média ± DP		CVe%	Média ± DP		CVe%	G	CH	G*CH
Morfológicas	AP	1,07 ± 0,203	**	12,3	1,05 ± 0,219	**	13,50	**	ns	**
	AE	0,501 ± 0,104	**	18,90	0,553 ± 0,189	**	17,10	**	ns	**
	DESP	22,0 ± 3,22	**	9,79	24,3 ± 3,57	**	9,83	**	**	**
	CESP	9,55 ± 1,75	**	13,40	10,4 ± 1,46	**	11,50	**	ns	**
Agronômicas	NGF	20,6 ± 1,22	**	19,90	22,7 ± 1,08	**	16,00	**	*	**
	NFG	11,9 ± 5,80	**	7,34	12,2 ± 5,69	**	6,58	**	*	ns
	MCG	7,24 ± 2,46	**	15,30	9,03 ± 2,02	**	12,7	**	**	**
	RG	264 ± 198	**	45,70	458 ± 286	**	37,5	**	**	**
	CE	13,0 ± 7,23	**	11,50	18,0 ± 5,97	**	8,00	**	**	**

G – genótipo; CH – condição hídrica; G × CH – interação genótipo × condição hídrica; CVe% – coeficiente de variação experimental. ** e * indicam significância estatística em 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ns – não significativo ($p > 0,05$).

NGF – número de grãos por fileira (unidade); NFG – número de fileiras de grãos (unidade); DESP – diâmetro da espiga (cm); CESP – comprimento da espiga (cm); AE – altura da espiga (cm); AP – altura da planta (cm); MCG – massa de 100 grãos (g); RG – rendimento de grãos (kg ha^{-1}); e CE – capacidade de expansão (mL g^{-1}).

A interação significativa entre genótipos e condição hídrica (G×CH) representa um desafio considerável aos programas de melhoramento genético, pois indica que o desempenho dos genótipos varia conforme o ambiente, refletindo a ausência de correlação da *performance* entre diferentes condições hídricas e dificultando a identificação de materiais superiores e estáveis. Essa instabilidade nas respostas fisiológicas compromete a previsibilidade dos ganhos genéticos e reduz a eficiência da seleção, especialmente em ambientes sujeitos a estresses abióticos, como o déficit hídrico. No entanto, o conhecimento e o monitoramento dessa interação podem amenizar seus efeitos por meio da condução de experimentos em múltiplos ambientes e anos agrícolas, possibilitando estimativas mais precisas da adaptabilidade e estabilidade dos genótipos avaliados.

A análise conjunta evidenciou diferença estatística significativa entre os genótipos estudados ($p < 0,01$) para todas as variáveis, demonstrando a existência de variabilidade genética no painel de linhagens avaliado. Também foi observada diferença significativa entre as condições hídricas para a maioria das características, com exceção de altura de planta (AP) e altura de altura da espiga (AE), as quais possivelmente apresentam menor sensibilidade ao estresse hídrico aplicado no período de pré-antese masculina, as plantas já estavam bem desenvolvidas quando o estresse ocorreu, causando poucos efeitos sobre essas linhagens (Tabela 4). Para a interação entre condição hídrica e genótipo (G×CH) quase todas as variáveis apresentaram interações significativas, com exceção do número de fileiras de grão (NFG).

Ademais, o efeito significativo das condições hídricas sobre as características morfoagronômicas evidencia o impacto do estresse hídrico imposto no período de pré-antese masculina, promovendo respostas entre os ambientes e afetando diretamente o rendimento da cultura. Assim, a suspensão da irrigação, iniciada aos dez dias antes da antese masculina, mostrou-se uma estratégia eficiente para simular a restrição hídrica e avaliar as respostas dos genótipos.

Quanto às características fisiológicas relacionadas aos índices de pigmentos foliares (clorofila, flavonoide e antocianina) e índice de balanço de nitrogênio, observou-se diferença significativa entre os genótipos avaliados, independentemente do número de dias após a imposição do estresse hídrico (dias

após suspensão da irrigação – DASI) e da condição hídrica. Esse resultado indica que há variabilidade genética entre as linhagens para essas características e que existe também variabilidade entre os dias avaliados, o que é fundamental para a seleção de genótipos com maior eficiência fisiológica sob diferentes condições hídricas (Tabela 5).

Com base na análise conjunta, pode-se observar que a condição hídrica também apresentou efeito significativo para a maioria das características fisiológicas avaliadas, sugerindo que a disponibilidade de água influencia a dinâmica temporal dos níveis de pigmentos foliares. Observa-se também que, para a maioria das características avaliadas, a interação genótipo×condição hídrica ($G \times CH$) não foi significativa (Tabela 5), o que indica que há correlação na resposta dos genótipos avaliados entre as diferentes condições hídricas, o que é proveitoso para o programa de melhoramento, pois sugere que os genótipos apresentam desempenho consistente em diferentes ambientes hídricos, facilitando a seleção de materiais superiores com maior estabilidade fisiológica e adaptabilidade.

Ademais, para as características fisiológicas, o coeficiente de variação experimental apresentou valores satisfatórios, exceto para duas características avaliadas aos onze dias após a imposição do estresse em WS, como conteúdo de clorofila (94,10%) e de flavonoide (95,60%), o que indica maior variabilidade nos dados obtidos nesse momento de avaliação. Esse alto $CV_e\%$ pode refletir em maior sensibilidade dessas características a fatores ambientais não controlados ou a maior heterogeneidade entre os genótipos avaliados.

Tabela 5. Resumo da análise de variância conjunta e individual, das estimativas das médias e dos desvios-padrão de quatro características fisiológicas avaliadas em quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas sob condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada).

Características		WS			WW			Conjunta		
		Média ± DP		CV _e %	Média ± DP		CV _e %	G	CH	G*CH
04 DASI	CHL1	33,7 ± 4,44	**	7,41	34,9 ± 3,54	**	9,66	**	**	ns
	FLAV1	1,26 ± 0,118	**	7,70	1,29 ± 0,113	**	9,17	**	ns	ns
	ANTH1	0,221 ± 0,021	**	6,30	0,216 ± 0,015	**	6,97	**	ns	ns
	NBI1	27,8 ± 4,41	**	12,7	28,3 ± 4,55	**	13,8	**	ns	ns
11 DASI	CHL2	33,2 ± 19,8	ns	9,41	32,9 ± 3,79	**	8,73	*	ns	ns
	FLAV2	1,52 ± 0,834	ns	9,56	1,27 ± 0,110	**	8,14	ns	**	ns
	ANTH2	0,220 ± 0,036	**	8,45	0,163 ± 0,018	**	8,24	**	**	**
	NBI2	23,7 ± 3,79	**	12,7	27,0 ± 4,09	**	11,9	**	**	ns
16 DASI	CHL3	31,5 ± 4,85	**	9,82	34,7 ± 3,84	**	9,05	**	**	*
	FLAV3	1,36 ± 0,125	**	7,16	1,37 ± 0,109	**	7,38	**	ns	**
	ANTH3	0,247 ± 0,026	**	7,77	0,227 ± 0,018	**	8,20	**	**	ns
	NBI3	24,0 ± 4,26	**	14,0	26,4 ± 4,07	**	12,3	**	**	**
22 DASI	CHL4	31,8 ± 5,16	**	12,2	34,0 ± 4,092	**	10,4	**	**	ns
	FLAV4	1,32 ± 0,117	**	8,13	1,41 ± 0,103	**	7,74	**	**	*
	ANTH4	0,255 ± 0,029	**	11,8	0,240 ± 0,033	**	9,02	**	**	ns
	NBI4	25,1 ± 4,80	**	16,2	25,0 ± 4,01	**	13,7	**	ns	ns
31 DASI	CHL5	28,0 ± 5,31	**	18,6	33,7 ± 5,03	**	13,8	**	**	ns
	FLAV5	1,37 ± 0,119	**	8,04	1,40 ± 0,122	**	7,43	**	*	ns
	ANTH5	0,287 ± 0,044	**	15,1	0,260 ± 0,032	**	19,2	**	**	ns
	NBI5	21,0 ± 4,14	**	21,6	25,1 ± 4,98	**	18,7	**	**	ns

G – genótipo; CH – condição hídrica; G×CH – interação genótipo x condição hídrica; e DASI – dias após a suspensão da irrigação; CV_e% – coeficiente de variação experimental. ** e * indicam significância estatística em 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ns – não significativo ($p > 0,05$). CHL – conteúdo foliar de clorofila ($\mu\text{g cm}^{-2}$); FLAV – conteúdo foliar de flavonoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$); ANTH – conteúdo foliar de antocianinas ($\mu\text{g cm}^{-2}$); e NBI – índice de balanço de nitrogênio.

5.2 Parâmetros genéticos

A compreensão e a estimativa dos parâmetros genéticos constituem um dos pilares fundamentais do melhoramento genético vegetal, pois permitem avaliar o potencial de seleção e a previsibilidade da resposta ao melhoramento. Dentre esses parâmetros, destacam-se aqueles que quantificam a variação fenotípica total em seus componentes ambientais e genéticos (Cruz et al., 2014). A variância ambiental (σ^2_e) expressa o grau de influência do ambiente sobre a expressão das características avaliadas, sendo essencial para identificar a estabilidade dos genótipos em diferentes condições. Já a variância genética (σ^2_g) reflete a magnitude da contribuição dos fatores genéticos para a variabilidade observada, estando diretamente relacionada ao potencial de ganhos com a seleção (Hallauer et al., 2010; Cruz et al., 2014).

Além dessas, estimadores como a razão entre o coeficiente de variação genético e ambiental (CV_g/CV_e) - também conhecido como índice de variação (IV) -, bem como a herdabilidade no sentido amplo, fornecem uma visão integrada da eficiência da seleção (Ferreira et al., 2012; Wang et al., 2020). O IV indica a predominância da variação genética em relação à ambiental e, portanto, a possibilidade de êxito com a seleção fenotípica direta.

A herdabilidade (ou coeficiente de determinação genotípico, no caso do modelo fixo), por sua vez, expressa a proporção da variância fenotípica total que é atribuída à variância genética, sendo um parâmetro central na previsão da resposta à seleção. A avaliação conjunta desses parâmetros permite não apenas caracterizar a base genética das características de interesse, mas também estimar com maior segurança o progresso genético possível em um programa de melhoramento (Sanchez et al., 2023).

Nesse estudo, de acordo com as estimativas de parâmetros genéticos de quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas sob distintas condições hídricas, pode-se inferir que as características CE, MCG, AP e DESP foram as que apresentaram os maiores valores do coeficiente de determinação genotípico (H^2) em WS, com percentuais de 98,60%, 93,40%, 86,40% e 85,40%, respectivamente; e em WW as características CE (98,10%), AE (91,90%), MCG (89,80%), RG (88,30%) e NGF (86,76%) foram aquelas com os maiores valores observados (Tabela 6).

Tabela 6. Estimativas da variância ambiental (σ^2_e), da variância genotípica (σ^2_g), do coeficiente de variação genético (CV_g), da razão CV_g/CV_e (IV) e do coeficiente de determinação genotípico (H^2) de nove características morfoagronômicas avaliadas em quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas sob condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada).

Características	WS					WW				
	σ^2_e	σ^2_g	$CV_g(\%)$	IV	H^2	σ^2_e	σ^2_g	$CV_g(\%)$	IV	H^2
NGF	5,60	28,9	26,1	1,31	83,8	4,40	28,8	23,6	1,48	86,8
NFG	0,254	1,29	9,55	1,30	83,5	0,213	0,994	8,19	1,25	82,3
DESP	1,55	9,11	13,7	1,40	85,4	1,91	11,1	13,7	1,39	85,3
CESP	0,548	2,60	16,9	1,26	82,6	0,479	0,479	12,6	1,09	78,1
AE	0,003	0,008	18,2	0,959	73,4	0,003	0,034	33,3	1,94	91,9
AP	0,006	0,037	18,0	1,46	86,4	0,007	0,042	19,6	1,45	86,3
MCG	0,410	5,80	33,3	2,18	93,4	0,438	3,85	21,7	1,71	89,8
RG	4838	35532	71,5	1,56	88,0	9858	74351	59,5	1,58	88,3
CE	0,745	52,9	56,0	4,86	98,6	0,690	35,8	33,3	4,16	98,1

NGF – número de grãos por fileira (unidade); NFG – número de fileira de grãos (unidade); DESP – diâmetro de espiga (cm); CESP – comprimento de espiga (cm); AE – altura de espiga (cm); AP – altura de planta (cm); MCG – massa de 100 grãos (g); RG – rendimento de grãos (Kg ha^{-1}); e CE – capacidade de expansão (mL g^{-1}).

De modo geral, em ambas as condições hídricas é possível inferir a possibilidade de ganhos para as duas principais características para o milho-pipoca, RG e CE, visto que em WW e WS essas características revelaram possuir baixa influência ambiental e, por consequência, elevados valores de H^2 . Além disso, observando as principais características secundárias relacionadas a RG, isto é, NGF, NFG, DESP, CESP e MCG, é possível prever ganhos indiretos em produtividade nas duas condições hídricas. Isso porque esse grupo de características apresentou valores acima da unidade para IV; e em WS, por exemplo, MCG apresentou estimativa de σ^2_g em magnitude superior em até quatorze vezes o valor de σ^2_e .

Em relação à característica número de fileiras de grãos (NFG), os resultados obtidos no presente trabalho demonstraram maior variância genotípica sob estresse hídrico ($\sigma^2_g = 1,29$) quando comparado ao estudo conduzido por Santos et al. (2021), que apresentaram valor de $\sigma^2_g = 0,75$, indicando maior variabilidade genética disponível para a seleção entre os genótipos avaliados. A herdabilidade também foi

superior no presente estudo ($H^2 = 83,50\%$) em relação aos 47,18% reportados por Santos et al. (2021), revelando maior proporção da variância fenotípica atribuída a fatores genéticos.

Por outro lado, resultados semelhantes foram observados por Santos et al. (2021) quanto à razão entre o coeficiente de variação ambiental (IV), reforçando a presença de maior controle genético para essa característica sob estresse. Sob condição de irrigação plena, os resultados também foram consistentes, com $\sigma^2_g = 0,99$, $H^2 = 82,30\%$ e $IV = 1,25$ no presente estudo, frente a $\sigma^2_g = 1,13$, $H^2 = 79,50\%$ e $IV = 1,25$ no trabalho de Santos et al. (2021), demonstrando boa repetibilidade dos dados e eficiência do delineamento experimental adotado.

Ademais, o trabalho em questão apresenta estimativas genéticas consistentes com as observadas por Santos et al. (2021), especialmente ao se considerar os efeitos das diferentes condições hídricas sobre as características avaliadas. Para MCG, ambos os estudos indicaram maior variância genotípica e coeficientes de variação genética mais expressivos sob estresse hídrico (WS), com razão CV_g/CV_e acima de 2,00 e coeficiente de determinação genotípico superior a 90,00%, apontando para boa possibilidade de seleção mesmo sob adversidade ambiental.

Da mesma forma, os resultados para RG evidenciaram ampla variabilidade genética em ambas as condições hídricas, com razão CV_g/CV_e superior a 1,50 e altos valores de herdabilidade, indicando que grande parte da variação fenotípica observada é de origem genética.

Já para CE, tanto os resultados aqui obtidos quanto os auferidos por Santos et al. (2021) demonstraram elevadas estimativas de variância genotípica, com coeficientes de variação genética superiores a 30,00%, além de razão CV_g/CV_e acima de 4,00 e estimativas de coeficientes de determinação genotípica próximos ou superiores a 98,00%, não apenas em WS, mas também em WW. Tais resultados revelam a similaridade entre os estudos e reforçam a confiabilidade das estimativas obtidas nesta dissertação, indicando que a seleção de genótipos promissores pode ser realizada com eficiência mesmo sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica.

Tabela 7. Estimativas da variância ambiental (σ^2_e), da variância genotípica (σ^2_g), do coeficiente de variação genético (CV_g) e do coeficiente de determinação genotípico (H^2) de quatro características fisiológicas avaliadas em quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas sob condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada).

Características		WS					WW				
		σ^2_e	σ^2_g	$CV_g(\%)$	IV	H^2	σ^2_e	σ^2_g	$CV_g(\%)$	IV	H^2
04 DASI	CHL1	2,08	18,2	12,6	1,71	89,7	3,78	9,10	8,65	0,895	70,6
	FLAV1	0,003	0,011	8,39	1,10	78,1	0,005	0,008	7,16	0,781	64,7
	ANTH1	0,000064	0,0004	8,73	1,39	85,2	0,0001	0,0001	5,62	0,806	66,1
	NBI1	4,16	15,8	14,3	1,13	79,2	5,06	15,9	14,1	1,02	75,8
11 DASI	CHL2	3,2538	75,0	26,1	0,277	18,7	2,75	12,0	10,5	1,2	81,3
	FLAV2	0,703	0,012	7,42	0,078	1,78	0,003	0,009	7,42	0,91	71,3
	ANTH2	0,0001	0,001	15,9	1,89	91,4	0,0001	0,0003	10,2	1,24	82,2
	NBI2	3,00	11,7	14,4	1,14	79,6	3,45	13,7	13,7	1,15	79,9
16 DASI	CHL3	3,18	20,9	14,5	1,48	86,8	3,29	11,9	9,92	1,1000	78,3
	FLAV3	0,003	0,013	8,33	1,16	80,2	0,003	0,01	6,82	0,92	71,9
	ANTH3	0,0001	0,0005	9,48	1,22	81,7	0,0001	0,0002	6,24	0,761	63,5
	NBI3	3,76	14,8	16,1	1,15	79,8	3,52	13,5	13,9	1,13	79,3
22 DASI	CHL4	5,04	22,2	14,8	1,21	81,5	4,16	13,0	10,6	1,02	75,8
	FLAV4	0,004	0,01	7,68	0,945	72,8	0,004	0,01	5,91	0,765	63,7
	ANTH4	0,0003	0,0006	9,26	0,782	64,7	0,0002	0,001	12,8	1,41	85,7
	NBI4	5,51	18,2	17,0	1,05	76,7	3,89	12,6	14,2	1,04	76,5
31 DASI	CHL5	8,99	20,0	16,0	0,86	68,9	7,15	18,8	12,9	0,938	72,5
	FLAV5	0,004	0,011	7,55	0,938	72,5	0,004	0,01	7,15	0,962	73,5
	ANTH5	0,0006	0,001	13,0	0,858	68,8	0,0008	0,001	12,0	0,626	54,0
	NBI5	6,90	10,7	15,5	0,718	60,7	7,37	18,1	16,9	0,904	71,0

CHL – conteúdo foliar de clorofila ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$); FLAV – conteúdo foliar de flavonoides ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$); ANTH – conteúdo foliar de antocianina ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$); e NBI – índice do balanço de nitrogênio.

Em se tratando dos conteúdos de pigmentos foliares e do índice de balanço de nitrogênio, é possível observar que, de modo geral, em WS houve menor predominância de σ^2_e (em relação a σ^2_g) do que em WW (Tabela 7), de modo que as estimativas de H^2 em WS produziram valores mais acentuados em WW. Isso porque treze das vinte estimativas de características fisiológicas avaliadas apresentaram maiores valores de H^2 em WS.

Visando selecionar genótipos com maior potencial de ganhos por seleção para as características avaliadas, sobretudo em WS, onde se espera obter o máximo da resposta de um genótipo para a condição de seca, é possível inferir com base nesses resultados obtidos que a avaliação aos dezesseis dias após a imposição do déficit hídrico permitiu maiores ganhos, visto que os valores de H^2 para esse momento em relação ao conjunto de variáveis avaliadas se destacou em relação aos demais dias de avaliação, o que pode também ser evidenciado pelos valores de IV mais elevados nesse mesmo período da avaliação, com valores acima da unidade, revelando maior contribuição de CV_g para essas características.

5.3 Influência relativa do déficit hídrico

Buscando compreender o impacto da imposição do estresse hídrico sobre um painel de quarenta linhagens de milho-pipoca e visando selecionar genótipos superiores para o programa de melhoramento, avaliou-se a redução percentual de características morfoagronômicas e fisiológicas desses genótipos cultivados em duas condições hídricas contrastantes, quais sejam, estresse hídrico, imposto 12 dias antes da antese masculina; e irrigada, em que o solo foi mantido à capacidade de campo (Figura 3 e 4).



Figura 3. Abrangências gráficas relativas das médias estimadas para nove características morfoagronômicas avaliadas em um painel de quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas em duas condições hídricas (WW - bem irrigada; e WS com déficit hídrico).

Em se tratando das características morfoagronômicas, RG, CE e MCG foram as mais afetadas pela condição de estresse hídrico (Figura 3). A variável RG apresentou uma redução de 42,60%, seguida por CE e MCG, com reduções de 27,80% e 19,80%, respectivamente, da condição WW para WS. As demais características apresentaram reduções inferiores a 10,00%, como NGF (9,53%), DESP (9,43%) e NFG (2,36%).

O déficit hídrico tem um impacto significativo na capacidade de expansão do milho-pipoca, afetando tanto o rendimento quanto a qualidade do produto final (Kamphorst et al., 2020; Oliveira et al., 2024). Durante o desenvolvimento da planta, especialmente no período de enchimento dos grãos após a polinização, o estresse hídrico compromete a produção e a deposição adequada de reservas, principalmente amido (Kamphorst et al., 2018; Kamphorst et al., 2021; Carvalho et

al., 2023). A redução na disponibilidade de água faz com que a planta diminua a translocação de fotoassimilados para os grãos, resultando em menor acúmulo de amido, que é fundamental para a explosão do grão durante o aquecimento. Além disso, o pericarpo, que é a camada externa do grão, pode se formar de maneira mais fina e frágil sob condições de estresse, dificultando sua capacidade de reter pressão interna até o ponto de ruptura (Chen et al., 2023). A vaporização da água presente no interior do grão de milho-pipoca é fundamental para o processo de expansão, pois, ao ser aquecida, gera uma pressão interna crescente que culmina no rompimento do pericarpo (Zinsly e Machado, 1980; Silva et al., 1993; Sawazaki, 2001; Paes, 2006). Esse rompimento permite a rápida liberação e expansão do amido gelatinizado, formando a pipoca. No entanto, quando o teor de umidade do grão é inferior ao ideal, a quantidade de vapor gerado é insuficiente para atingir a pressão necessária, comprometendo a explosão e resultando em menor capacidade de expansão ou até mesmo em grãos não estourados.

Portanto, o estresse hídrico prejudica tanto o acúmulo de componentes essenciais do grão quanto o equilíbrio hídrico necessário para uma expansão eficiente. Isso explica por que a capacidade de expansão está entre as características mais afetadas em ambientes com baixa disponibilidade de água. Esse impacto reforça a importância de selecionar genótipos que consigam manter a qualidade do grão mesmo sob estresse hídrico, visando à obtenção de cultivares adaptadas e com bom desempenho fenológico.

Em relação às características fisiológicas, as variações de redução e aumento indicam que algumas variáveis foram mais sensíveis ao estresse hídrico, enquanto outras demonstraram maior estabilidade. A concentração de clorofila (CHL) apresentou reduções gerais entre 3,40% e 16,90%, sendo que, após a suspensão da irrigação, essas quedas se acentuaram, atingindo 16,90% aos trinta e um dias após a suspensão da irrigação (Figura 4).

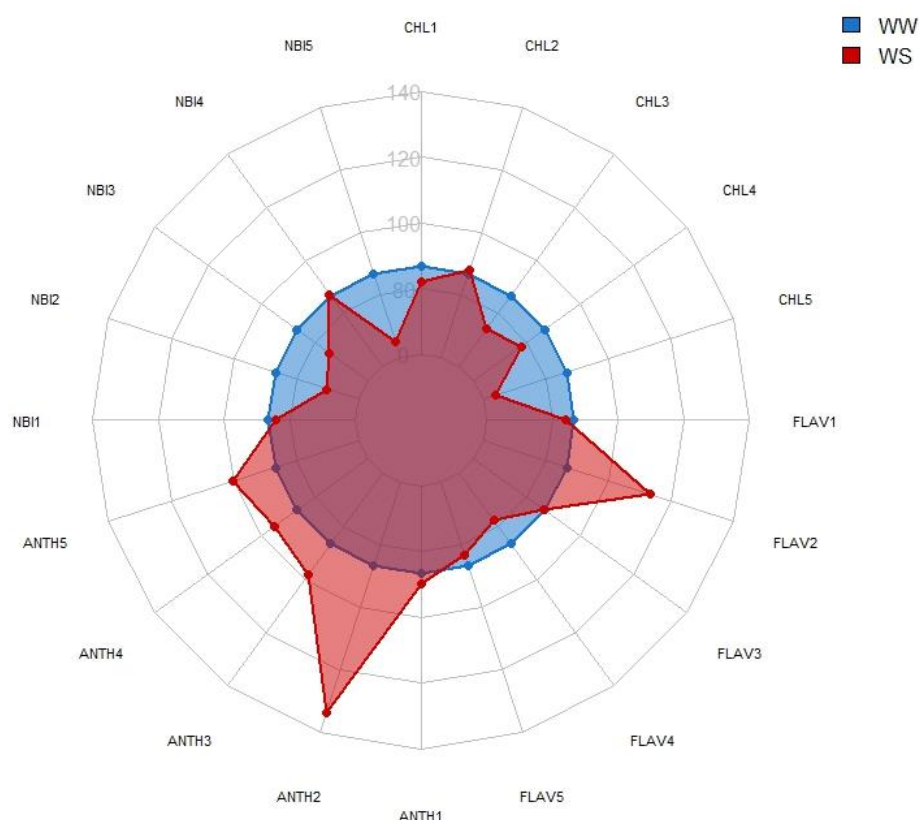


Figura 4. Abrangências gráficas relativas das médias estimadas para quatro características fisiológicas avaliadas em um painel de quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas em duas condições hídricas (WW - bem irrigada; e WS com déficit hídrico).

Para os flavonoides (FLAV), observaram-se reduções entre 0,24% e 6,60%, com o maior decréscimo registrado aos vinte e dois dias após o corte da irrigação. Por outro lado, o teor de antocianinas (ANTH) apresentou aumentos entre 2,31% e 35,10%, sendo este último observado aos onze dias após a suspensão da irrigação. O acúmulo de antocianinas em situações de estresse hídrico é um mecanismo conhecido de fotoproteção, associado à mitigação de danos oxidativos, o que pode contribuir para a maior tolerância da planta às condições adversas (Oliveira et al., 2024).

Em condições de estresse hídrico, a planta tende a fechar os estômatos para evitar a perda de água, o que reduz a entrada de CO_2 e compromete a atividade fotossintética. Esse cenário leva ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), devido ao desequilíbrio entre a absorção de luz e a capacidade de utilização da energia luminosa. Nesse contexto, o acúmulo de antocianinas exerce um papel fotoprotetor, ao reduzir a intensidade da luz que atinge os cloroplastos e neutralizar as EROs,

protegendo a maquinaria fotossintética. Com isso, a planta consegue manter, mesmo que de forma limitada, a fotossíntese, favorecendo a síntese e a translocação de fotoassimilados, como a sacarose para os grãos, onde serão convertidos em amido. Esse processo é fundamental para garantir a qualidade e o rendimento dos grãos de milho-pipoca, mesmo sob condições adversas (Taiz et al., 2024).

O índice de balanço de nitrogênio (NBI) apresentou variações que oscilaram entre uma redução de 16,30% e um leve aumento de 0,43%, sendo este último registrado aos vinte e dois dias após o corte da irrigação. O aumento do NBI sob déficit hídrico ou baixa disponibilidade de nitrogênio reflete a priorização do uso do nitrogênio para a síntese de clorofila, mantendo a fotossíntese ativa, enquanto a produção de flavonoides é reduzida. Esse direcionamento metabólico é uma estratégia funcional das plantas para sobreviver em condições adversas (Qian Wanget al., 2024).

Dessa forma, o aumento do NBI sugere que a planta mantém um estado nutricional relativamente adequado, com preservação da estrutura e função do aparato fotossintético, mesmo sob estresse hídrico (Kamphorst et al., 2020; Santos et al., 2021; Oliveira et al., 2024). Além disso, essa resposta pode indicar uma estratégia adaptativa voltada à manutenção da assimilação de carbono, reduzindo temporariamente o investimento em vias secundárias de defesa baseadas em flavonoides.

Nessa perspectiva, a avaliação aos vinte e dois dias após a suspensão da irrigação se destacou como o prazo ideal para avaliar as características relacionadas ao conteúdo de pigmentos foliares por concentrar respostas fisiológicas relevantes, sobretudo, por ser um momento de grande estresse para as plantas, induzindo-as ao máximo da resposta à limitação de água no solo. Nesse sentido, nesse período, houve o maior decréscimo nos flavonoides e aumento em NBI, indicando ser um ponto de equilíbrio entre o estresse sofrido e os mecanismos de adaptação da planta. Esses sinais refletem ajustes importantes na fisiologia vegetal diante do déficit hídrico.

5.4 Análise do agrupamento de linhagens de milho-pipoca avaliadas sob diferentes regimes hídricos

Buscando inferir sobre a plasticidade fenotípica das quarenta linhagens de milho-pipoca avaliadas, procedeu-se ao estudo do agrupamento dos genótipos por Scott-Knott com base nas características morfoagronômicas e fisiológicas investigadas em ambas as condições hídricas (WW e WS) (Tabelas 8 a 14).

Tabela 8. Agrupamento univariado de quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas sob condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada) para características morfológicas.

Linhagem	NGF		NFG		DESP		CESP		AE		AP	
	WS	WW	WS	WW	WS	WW	WS	WW	WS	WW	WS	WW
L203	16,1 Ac	20,8 Ac	12,9 Ab	13,2 Aa	18,3 Ac	19,9 Ad	9,55 Ac	10,4 Aa	0,62 Aa	0,40 Be	1,48 Aa	1,18 Bb
L204	12,6 Bd	24,9 Ab	10,5 Bd	11,9 Ab	16,4 Bc	23,9 Ac	8,04 Bd	12,0 Aa	0,56 Aa	0,33 Be	0,91 Ab	0,83 Ac
L217	29,9 Aa	25,5 Ab	14,0 Aa	12,7 Aa	26,1 Aa	23,6 Ac	12,7 Ab	11,7 Aa	0,36 Bb	0,60 Ad	1,02 Bb	1,36 Aa
L220	21,9 Ab	16,5 Ad	11,4 Ac	10,4 Ac	21,8 Ab	21,4 Ac	9,20 Ac	8,92 Ab	0,44 Ab	0,56 Ad	0,93 Ab	0,91 Ac
L263	17,1 Ac	21,9 Ac	11,9 Ac	12,1 Ab	19,5 Ab	22,6 Ac	7,47 Ad	8,50 Ab	0,48 Ab	0,53 Ad	1,33 Aa	1,21 Ab
L273	17,6 Bc	26,6 Ab	11,7 Ac	12,2 Ab	21,8 Ab	22,3 Ac	7,37 Ad	9,30 Ab	0,57 Aa	0,51 Ad	1,00 Ab	0,97 Ac
L291	27,1 Aa	23,9 Ab	12,4 Ab	12,4 Aa	20,8 Ab	23,9 Ac	9,63 Ac	9,67 Ab	0,48 Ab	0,39 Ae	1,19 Aa	1,21 Ab
L292	27,2 Aa	30,8 Aa	11,7 Ac	12,5 Aa	22,8 Ba	29,1 Ab	10,9 Bb	12,9 Aa	0,46 Ab	0,47 Ad	0,93 Ab	0,83 Ac
L294	16,3 Ac	15,6 Ad	11,3 Ac	12,4 Aa	20,6 Ab	22,5 Ac	8,67 Ac	10,0 Ab	0,53 Ba	0,72 Ac	1,27 Aa	1,27 Aa
L321	18,9 Ac	12,8 Ad	11,3 Ac	12,1 Ab	23,8 Aa	22,0 Ac	11,0 Ab	10,9 Aa	0,52 Aa	0,59 Ad	1,00 Ab	0,87 Ac
L324	20,9 Ac	20,4 Ac	9,91 Ad	11,1 Ab	17,9 Ac	16,1 Ad	8,98 Ac	9,77 Ab	0,49 Bb	0,67 Ac	1,23 Aa	1,05 Ab
L332	16,4 Ac	19,8 Ac	9,20 Ad	9,88 Ac	16,4 Bc	26,7 Ab	7,11 Bd	10,6 Aa	0,45 Ab	0,49 Ad	0,96 Ab	0,87 Ac
L358	10,7 Bd	18,3 Ac	9,33 Ad	9,28 Ac	17,1 Ac	18,7 Ad	8,87 Ac	9,81 Ab	0,69 Aa	0,50 Bd	1,27 Aa	1,31 Aa
L381	12,6 Ad	10,9 Ad	11,7 Ac	11,2 Ab	18,3 Ac	18,0 Ad	7,50 Ad	7,33 Ab	0,63 Aa	0,43 Be	1,01 Ab	0,81 Ac
L382	12,2 Bd	18,8 Ac	10,7 Ad	11,9 Ab	17,7 Ac	20,1 Ad	7,67 Ad	7,86 Ab	0,50 Bb	0,65 Ac	1,23 Aa	1,35 Aa
L386	14,7 Ad	20,8 Ac	11,8 Bc	13,6 Aa	18,7 Bc	22,4 Ac	8,24 Ad	9,24 Ab	0,36 Bb	0,63 Ac	0,75 Bc	1,14 Ab
L391	18,1 Ac	20,9 Ac	10,4 Ad	11,3 Ab	19,8 Ab	21,0 Ac	11,1 Ab	11,1 Aa	0,33 Ab	0,28 Af	0,75 Bc	1,05 Ab
L472	23,4 Ab	26,1 Ab	11,7 Ac	11,2 Ab	20,1 Bb	25,2 Ab	8,59 Ac	10,2 Ab	0,33 Ab	0,20 Af	0,68 Ac	0,70 Ac
L501	18,8 Bc	28,4 Ab	12,1 Ac	12,5 Aa	21,2 Bb	25,5 Ab	7,89 Bd	10,5 Aa	0,43 Ab	0,31 Af	1,08 Ab	0,64 Bc
L507	24,0 Ab	24,7 Ab	11,6 Ac	12,4 Aa	21,3 Ab	20,9 Ac	8,58 Ac	8,77 Ab	0,37 Ab	0,35 Ae	0,84 Ac	0,74 Ac

Tabela 8. Cont.

Linhagem	NGF		NFG		DESP		CESP		CESP		CESP		CESP		CESP	
	WS	WW	WS	WW	WS	WW	WS	WW	WS	WW	WS	WW	WS	WW	WS	WW
L509	15,5	Ad	20,9	Ac	10,7	Ad	10,4	Ac	20,8	Ab	22,3	Ac	8,37	Ac	8,73	Ab
L54	20,7	Ac	19,7	Ac	10,5	Ad	11,5	Ab	20,3	Ab	21,5	Ac	9,83	Ac	9,93	Ab
L59	20,3	Bc	26,8	Ab	11,9	Ac	11,8	Ab	23,3	Ba	27,3	Ab	10,6	Ab	11,3	Aa
L61	12,7	Ad	17,1	Ad	12,9	Ab	13,1	Aa	19,3	Bb	23,2	Ac	8,80	Ac	8,67	Ab
L63	21,9	Ab	24,9	Ab	15,1	Aa	13,7	Aa	26,7	Aa	27,8	Ab	9,90	Ac	11,3	Aa
L65	22,3	Ab	20,7	Ac	13,9	Aa	14,4	Aa	28,7	Ba	32,5	Aa	11,4	Ab	11,8	Aa
L655	19,9	Ac	18,9	Ac	11,8	Ac	12,7	Aa	23,4	Aa	26,1	Ab	9,03	Ac	9,83	Ab
L684	13,7	Ad	18,9	Ac	13,6	Aa	13,1	Aa	20,8	Bb	25,2	Ab	6,20	Bd	10,6	Aa
L688	12,9	Ad	15,4	Ad	11,7	Ac	11,8	Ab	24,6	Aa	23,7	Ac	7,42	Ad	7,50	Ab
L691	18,3	Ac	21,9	Ac	11,6	Ac	11,9	Ab	25,0	Aa	27,1	Ab	9,17	Ac	10,5	Aa
L693	26,7	Aa	15,9	Bd	12,9	Ab	12,5	Aa	25,2	Aa	27,0	Ab	15,0	Aa	11,4	Ba
L71	19,6	Ac	18,7	Ac	12,8	Ab	12,0	Ab	25,4	Aa	23,8	Ac	10,1	Ab	9,71	Ab
L75	31,5	Aa	31,2	Aa	11,2	Ac	11,7	Ab	25,9	Aa	28,9	Ab	11,0	Ab	11,7	Aa
L76	20,8	Ac	23,5	Ab	13,6	Aa	14,0	Aa	25,8	Aa	28,1	Ab	9,57	Ac	11,0	Aa
P2	29,4	Aa	26,6	Ab	13,1	Ab	13,5	Aa	27,2	Aa	25,8	Ab	11,5	Ab	9,93	Ab
P3	28,4	Aa	28,9	Ab	12,4	Ab	11,9	Ab	24,5	Ba	32,9	Aa	11,2	Ab	12,8	Aa
P4	29,9	Aa	33,5	Aa	12,4	Ab	12,7	Aa	27,1	Aa	28,4	Ab	12,1	Ab	13,1	Aa
P6	28,6	Aa	34,1	Aa	12,1	Ac	13,4	Aa	21,1	Bb	25,9	Ab	9,53	Bc	12,2	Aa
P7	27,7	Ba	34,8	Aa	10,9	Ad	11,2	Ab	22,4	Aa	24,7	Ab	11,2	Ab	12,9	Aa
P8	25,6	Ab	28,5	Ab	12,1	Ac	13,2	Aa	24,1	Aa	25,5	Ab	11,3	Ab	11,5	Aa

NGF – número de grãos por fileira (índice); NFG – número de fileira de grãos (índice); DESP – diâmetro de espiga (cm); CESP – comprimento de espiga (cm); AE – altura de espiga (cm); AP – altura de planta (cm); MCG – massa de 100 grãos (g); RG – rendimento de grãos (Kg ha⁻¹); e CE – capacidade de expansão (mL g⁻¹).

Para a característica NGF, foram formados quatro grupos de médias sob condição de irrigação plena (WW) e quatro grupos sob condição de déficit hídrico (WS). As linhagens com as maiores médias em ambos os ambientes, foram: L75, L292, L291, P6, P4, P3, P2, P7, L217 e P8 (Tabela 8).

Quanto a NFG, três grupos foram formados sob WW e quatro sob WS, sobressaindo-se as linhagens L63, L217, L65, L76, L684, L203, L61, P2, P4 e P3 com os melhores desempenhos (Tabela 8).

Em alusão a DESP, foram constituídos três grupos em ambos os ambientes. As maiores médias sob déficit hídrico foram observadas em L65, P4, P2, L63, L76, L75, L693, L691, L217 e P3. São, pois, linhagens com maior robustez das espigas e com potencial de maior acúmulo de massa de grãos. Para CESP, dois grupos foram formados sob WW e quatro sob WS. As linhagens mais estáveis e com melhores médias sob WS, foram: L693, L217, P4, P8, L65, P7, P3, L391, L321 e L75 (Tabela 8). Essa estabilidade no comprimento da espiga, mesmo em condições adversas, é um indicativo de boa arquitetura e desenvolvimento da estrutura reprodutiva.

No que se refere à característica AE, foram observados seis grupos sob WW e dois sob WS. Em ambas as condições foram reunidas as linhagens P2, L75, L693, L63, P7, P4, P8, P3, L76 e L358 (Tabela 8).

Por fim, para a característica AP, três grupos foram formados em ambos os ambientes. As linhagens com melhores desempenhos em WS, foram: L203, L75, P2, L688, L358, P4, L693 e L63 (Tabela 8).

Com base no desempenho sob déficit hídrico, recomenda-se o uso das seguintes linhagens com alto potencial agrônomo, a saber, L75, L217, L63, L65, L693, L76, L203, L292, P2 e P4. Essas linhagens destacaram-se por apresentar bons valores para características produtivas essenciais, como número de grãos por fileira, número de fileiras por espiga, diâmetro e comprimento da espiga. Dessa forma, representam alternativas promissoras para o uso em programas de melhoramento genético voltados à tolerância ao déficit hídrico.

Tabela 9. Agrupamento univariado de quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas sob condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada) para características agrônômicas.

	MCG				RG				CE	
	WS		WW		WS		WW		WS	WW
L203	0,00	Bf	4,91	Ae	0,00	Ad	53,98	Ad	0,00	Bi
L204	6,69	Bd	9,98	Ac	58,71	Ad	252,84	Ac	6,67	Bg
L217	7,59	Ac	7,94	Ad	515,15	Aa	581,44	Ab	4,13	Ah
L220	6,62	Bd	8,90	Ad	62,50	Ad	127,84	Ad	10,67	Bf
L263	6,09	Ad	6,42	Ae	176,14	Ac	298,29	Ac	3,67	Bh
L273	5,98	Ad	6,10	Ae	285,99	Bc	599,43	Ab	19,00	Bd
L291	5,83	Bd	8,44	Ad	293,56	Ac	350,38	Ac	14,17	Ae
L292	9,19	Bc	12,10	Ab	375,00	Bb	996,21	Aa	10,17	Bf
L294	4,68	Be	7,86	Ad	24,62	Ad	148,67	Ad	4,67	Bh
L321	11,01	Ab	11,10	Ac	280,30	Ac	289,77	Ac	13,69	Be
L324	4,01	Ae	5,41	Ae	11,36	Ad	91,86	Ad	7,33	Bg
L332	6,50	Ad	8,11	Ad	96,59	Bd	453,60	Ac	17,02	Ad
L358	8,84	Bc	10,71	Ac	108,90	Ad	159,09	Ad	9,78	Af
L381	7,48	Ac	7,57	Ad	96,59	Ad	60,61	Ad	10,48	Bf
L382	6,88	Ad	7,91	Ad	37,88	Ad	107,95	Ad	5,68	Ah
L386	5,54	Be	7,72	Ad	51,14	Ad	123,11	Ad	9,90	Af
L391	8,87	Bc	11,10	Ac	221,59	Ac	312,50	Ac	20,33	Ac
L472	5,53	Ae	6,17	Ae	197,92	Bc	450,76	Ac	14,28	Ae
L501	6,39	Bd	8,63	Ad	238,63	Bc	797,35	Aa	5,33	Bh
L507	6,74	Ad	6,90	Ae	282,20	Ac	361,74	Ac	10,33	Bf
L509	7,72	Ac	8,98	Ad	238,64	Bc	515,15	Ab	21,25	Bc
L54	6,90	Bd	8,99	Ad	301,14	Ac	275,95	Ac	25,11	Bb
L59	8,46	Bc	11,02	Ac	268,94	Ac	375,00	Ac	24,89	Ab
L61	7,01	Ad	7,59	Ad	134,47	Ad	214,01	Ad	23,55	Ab
L63	8,17	Ac	9,16	Ad	604,16	Ba	856,06	Aa	11,89	Bf
L65	11,18	Bb	13,94	Aa	682,77	Aa	903,41	Aa	16,31	Bd
L655	7,57	Ac	8,92	Ad	253,79	Bc	551,13	Ab	20,67	Ac
L684	4,44	Be	8,34	Ad	85,23	Ad	285,98	Ac	7,02	Ag
L688	10,36	Bb	12,59	Ab	176,13	Ac	388,26	Ac	14,58	Be
L691	6,94	Ad	8,71	Ad	342,80	Ab	500,00	Ac	12,02	Af
L693	0,00	Bf	10,11	Ac	0,00	Bd	375,00	Ac	0,00	Bi
L71	9,80	Ab	10,29	Ac	122,16	Ad	197,92	Ad	24,96	Ab
L75	9,28	Ac	10,30	Ac	803,03	Aa	869,32	Aa	20,89	Bc
L76	8,06	Bc	10,27	Ac	369,32	Bb	645,83	Ab	29,78	Aa
P2	8,36	Ac	8,37	Ad	534,09	Aa	596,59	Ab	18,28	Ad
P3	12,65	Aa	14,11	Aa	562,50	Ba	1012,31	Aa	11,72	Bf
P4	9,28	Ac	10,16	Ac	549,24	Ba	1035,98	Aa	14,72	Be
P6	6,78	Ad	7,85	Ad	299,24	Bc	642,04	Ab	10,11	Bf
P7	7,82	Ac	8,63	Ad	368,75	Bb	945,08	Aa	6,77	Bg
P8	8,30	Ac	8,94	Ad	435,60	Ab	541,67	Ab	7,22	Bg

MCG – massa de cem grãos (g); RG – rendimento de grãos (Kg há⁻¹); e CE – capacidade de expansão (mL g⁻¹).

Para a característica MCG (massa de cem grãos), observaram-se cinco grupos de médias sob condição de irrigação plena (WW) e seis grupos sob condição de déficit hídrico (WS). As linhagens com as maiores médias em ambos os ambientes, foram: L292, L321, L391, L59, L65L, L688, L71, L75, P3 e P4 (Tabela 9).

Em relação à característica RG (rendimento de grãos), foram formados quatro grupos de médias tanto sob irrigação plena quanto sob déficit hídrico, destacando-se as linhagens L217, L63, L65P2, P3, P4, P6 e P8 por apresentarem os maiores valores médios em ambas as condições (Tabela 9). Para a característica CE (capacidade de expansão), seis grupos foram observados sob condição WW e nove grupos sob WS, com destaque para as linhagens L391, L509, L54, L59, L61, L655, L71, L75, L76 e P2, que mantiveram médias elevadas em ambos os ambientes (Tabela 9).

De modo geral, as linhagens L59, L65, L71, L75 e P4 se destacaram por apresentarem os melhores desempenhos nas três características avaliadas (MCG, RG e CE), demonstrando potencial para uso em programas de melhoramento visando produtividade e qualidade de grãos. No entanto, observou-se que as linhagens com maior RG, como P3, P4, P6 e P8, não apresentaram as maiores médias de CE (Tabela 9).

Essa divergência pode ser explicada pela natureza genética e fisiológica distinta dessas características, uma vez que a produtividade está mais relacionada a atributos morfoagronômicos, como número de espigas e massa de grãos, enquanto a capacidade de expansão está associada à estrutura e composição física dos grãos, como densidade e teor de umidade interna. Assim, a seleção simultânea para alto rendimento e alta capacidade de expansão requer estratégias específicas de melhoramento que considerem o equilíbrio entre produtividade e qualidade tecnológica dos grãos.

Tabela 10. Agrupamento univariado de quarenta linhagens de milho-pipoca para características fisiológicas avaliadas em DAS1 (quatro dias após a suspensão da irrigação) sob cultivo em condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada).

Linhagem	CHL1		FLAV1		ANTH1		NBI1	
	WS	WW	WS	WW	WS	WW	WS	WW
L203	31,7 c	34,0 a	1,17 c	1,14 b	0,23 b	0,21 b	27,8 b	30,6 b
L204	31,5 c	30,9 b	1,17 c	1,17 b	0,23 b	0,24 a	27,6 b	27,4 c
L217	35,4 b	35,8 a	1,21 c	1,23 b	0,20 c	0,21 b	30,7 a	30,0 b
L220	35,9 b	31,3 b	1,32 b	1,32 a	0,21 c	0,22 a	27,5 b	24,2 c
L263	37,7 a	38,2 a	1,29 b	1,42 a	0,19 d	0,20 b	30,2 a	28,1 c
L273	38,8 a	36,4 a	1,41 b	1,23 b	0,21 c	0,21 b	28,3 b	31,1 b
L291	40,2 a	39,7 a	1,35 b	1,23 b	0,19 d	0,19 b	30,7 a	33,6 b
L292	43,2 a	37,3 a	1,17 c	1,27 b	0,18 d	0,20 b	39,9 a	30,6 b
L294	28,6 c	31,8 b	1,08 d	1,28 b	0,24 b	0,23 a	27,6 b	25,2 c
L321	34,3 b	32,9 b	1,56 a	1,59 a	0,21 c	0,23 a	22,3 c	20,9 d
L324	25,7 d	29,0 b	1,49 a	1,47 a	0,26 a	0,24 a	17,5 c	20,2 d
L332	35,9 b	39,2 a	1,22 c	1,30 a	0,22 c	0,21 b	30,4 a	30,8 b
L358	22,4 d	27,3 b	1,25 c	1,25 b	0,28 b	0,24 a	18,6 c	22,9 d
L381	31,8 c	29,0 b	1,37 b	1,37 a	0,23 b	0,24 a	23,9 c	21,5 d
L382	24,7 d	27,9 b	1,27 c	1,36 a	0,27 b	0,25 a	20,2 c	21,4 d
L386	28,9 c	32,2 b	1,22 c	1,27 b	0,24 b	0,22 a	24,3 b	26,3 c
L391	32,0 c	36,6 a	1,38 b	1,36 a	0,23 b	0,22 b	24,0 b	27,7 c
L472	31,3 c	37,3 a	1,18 c	1,22 b	0,23 b	0,20 b	27,3 b	31,3 b
L501	35,7 b	38,1 a	1,30 b	1,24 b	0,22 c	0,21 b	27,7 b	31,7 b
L507	35,4 b	38,4 a	1,22 c	1,18 b	0,22 c	0,20 b	30,1 a	33,9 b
L509	34,1 b	34,3 a	1,35 b	1,37 a	0,22 c	0,23 a	25,6 b	25,7 c
L54	26,5 d	28,0 b	1,27 c	1,41 a	0,25 a	0,23 a	21,9 c	20,2 d
L59	35,5 b	34,0 a	1,26 c	1,37 a	0,21 c	0,22 a	28,9 a	26,1 c
L61	34,5 b	35,5 a	1,32 b	1,35 a	0,22 c	0,21 b	27,0 b	26,9 c
L63	35,5 b	36,3 a	1,20 c	1,18	0,21 c	0,20 b	31,1 a	32,7 b
L65	37,8 a	39,4 a	1,18 c	1,06 b	0,20 d	0,19 b	33,7 a	39,2 a
L655	32,8 b	36,6 a	1,26 c	1,36 a	0,22 c	0,22 b	26,8 b	27,8 c
L684	28,4 c	30,3 b	0,96 d	1,10 b	0,23 b	0,22 a	30,8 a	28,3 c
L688	33,2 b	36,2 a	1,35 b	1,15 b	0,22 c	0,20 b	25,3 b	33,7 b
L691	35,7 b	38,1 a	1,10 d	1,05 b	0,21 c	0,20 b	33,5 a	37,6 a
L693	29,6 c	31,9 b	1,22 c	1,28 b	0,23 b	0,22 a	25,4 b	26,1 c
L71	42,1 a	41,2 a	1,25 c	1,16 b	0,20 d	0,20 b	34,4 a	37,5 a
L75	33,9 b	36,2 a	1,34 b	1,31 a	0,22 c	0,21 b	27,0 b	28,3 c
L76	32,4 c	35,0 a	1,03 d	1,28 b	0,24 b	0,24 a	32,1 a	28,3 c
P2	39,9 a	38,4 a	1,26 c	1,35 a	0,20 d	0,20 b	33,7 a	28,5 c
P3	36,4 b	38,1 a	1,51 a	1,47 a	0,21 c	0,21 b	24,4 b	27,0 c
P4	34,9 b	34,5 a	1,24 c	1,36 a	0,21 c	0,21 b	29,5 a	26,5 c
P6	35,9 b	35,5 a	1,21 c	1,38 a	0,21 c	0,22 a	31,6 a	27,2 c
P7	33,1 b	36,5 a	1,23 c	1,30 a	0,22 c	0,20 b	28,3 b	29,3 b
P8	34,7 b	35,7 a	1,38 b	1,37 a	0,22 c	0,21 b	25,6 b	26,4 c

CHL – conteúdo foliar de clorofila ($\mu\text{g cm}^{-2}$); FLAV – conteúdo foliar de flavonoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$); ANTH – conteúdo foliar de antocianina ($\mu\text{g cm}^{-2}$); e NBI – índice do balanço de nitrogênio.

Para a variável CHL1, foram formados dois grupos de médias sob irrigação plena (WW) e quatro sob déficit hídrico (WS). Sobressaíram-se as linhagens L292, L71, L291, P2, L273, L65, L263, P3, P6 e L691, por apresentarem as maiores estimativas de médias em ambas as condições hídricas (Tabela 10).

No que se refere a FLAV1, houve a formação de dois grupos, ao passo que em WW as linhagens se reuniram em quatro grupos. As linhagens com maior acúmulo de flavonoides em ambas as condições hídricas, foram: L321, P3, L324, L273, P8, L391, L381, L509, L75 e L220 (Tabela 10).

Com relação a ANTH1, foram compostos dois grupos em WW e quatro em WS. Em ambos os ambientes, as linhagens L358, L382, L324, L54, L294, L76, L386, L204 e L381 detiveram as médias superiores (Tabela 10).

Quanto a NBI1, foram constituídos três grupos em WW e quatro em WS. As linhagens com melhores desempenhos nessas condições, foram: L291, L71, L65, P2, L691, L63, L217, L507 e L332 (Tabela 10).

Para CHL2, as linhagens se reuniram em apenas um grupo de médias sob condição de irrigação plena (WW) e dois grupos sob condição de déficit hídrico (WS). De todo modo, destacaram-se as linhagens L292, L273, L71, P3, L65, P2, P6, L217 e L321, por expressarem as maiores estimativas de médias em ambos os ambientes (Tabela 11).

De forma análoga, FLAV2 também proporcionou a formação de um único grupo de linhagens sob irrigação plena (WW) e dois grupos sob estresse hídrico (WS). Na condição WS, as linhagens com maiores médias, foram: P2, L291, L321, L688, L381, L324, L391, L61, L332 e P4 (Tabela 11).

Em relação à variável ANTH2, cinco grupos foram compostos sob a condição de irrigação plena e quatro sob déficit hídrico. O destaque para as linhagens com as maiores médias em ambos os ambientes, recaiu para: L358, L324, L76, L263, L386, L391, L509, L61, L655 e L693 (Tabela 11).

NBI2 acarretou na formação de quatro grupos sob irrigação plena e dois grupos sob déficit hídrico, com destaque para as linhagens L71, L273, P6, L294, L69, L65, P2, L220, P3 e L217, que exibiram os maiores valores de médias para ambas as condições hídricas impostas (Tabela 11).

Tabela 11. Agrupamento univariado de quarenta linhagens de milho-pipoca para características fisiológicas avaliadas em DAS2 (onze dias após a suspensão da irrigação) sob cultivo em condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada).

Linhagem	CHL2				FLAV2				ANTH2				NBI	
	WS		WW		WS		WW		WS		WW		WS	WW
L203	30,4	Ab	29,7	Aa	1,27	Ab	1,34	Aa	0,23	Ac	0,17	Bc	24,2	Ab
L204	24,2	Ab	30,0	Aa	1,25	Ab	1,27	Aa	0,21	Ac	0,17	Bd	21,1	Ab
L217	34,0	Ab	36,8	Aa	1,31	Ab	1,13	Aa	0,19	Ad	0,15	Be	26,4	Ba
L220	31,4	Ab	34,7	Aa	1,18	Ab	1,24	Aa	0,17	Ac	0,16	Ae	27,2	Aa
L263	28,1	Ab	32,0	Aa	1,35	Ab	1,27	Aa	0,25	Ac	0,16	Bc	21,5	Ab
L273	37,6	Ab	37,8	Aa	1,27	Ab	1,22	Aa	0,22	Ad	0,14	Bd	30,3	Aa
L291	39,7	Aa	40,5	Ba	1,35	Aa	1,32	Ba	0,17	Ad	0,13	Be	30,5	Aa
L292	38,2	Ab	39,9	Aa	1,43	Ab	1,21	Aa	0,17	Ad	0,14	Be	27,1	Ba
L294	30,2	Ab	34,2	Aa	1,09	Ab	1,21	Aa	0,22	Ac	0,16	Bd	28,8	Aa
L321	33,7	Ab	31,5	Aa	1,63	Ab	1,55	Aa	0,20	Ac	0,17	Bd	20,9	Ab
L324	25,8	Ab	30,3	Aa	1,48	Ab	1,35	Aa	0,27	Ac	0,17	Bb	17,7	Ab
L332	32,1	Ab	36,7	Aa	1,46	Ab	1,32	Aa	0,24	Ac	0,16	Bc	22,1	Bb
L358	21,7	Ab	25,0	Aa	1,33	Ab	1,34	Aa	0,29	Ab	0,20	Bb	17,0	Ab
L381	31,1	Ab	28,4	Aa	1,50	Ab	1,35	Aa	0,22	Ac	0,18	Bd	20,9	Ab
L382	21,6	Ab	21,7	Aa	1,34	Ab	1,34	Aa	0,32	Aa	0,23	Ba	16,7	Ab
L386	23,9	Ab	29,2	Aa	1,25	Ab	1,15	Aa	0,25	Ac	0,17	Bc	19,4	Bb
L391	29,3	Ab	31,3	Aa	1,48	Ab	1,43	Aa	0,25	Ac	0,17	Bc	20,7	Ab
L472	30,3	Ab	32,5	Aa	1,32	Ab	1,09	Aa	0,23	Ad	0,15	Bc	23,4	Bb
L501	28,3	Ab	36,4	Aa	1,23	Ab	1,16	Aa	0,26	Ad	0,15	Bc	24,7	Ba
L507	33,3	Ab	33,7	Aa	1,31	Ab	1,11	Aa	0,23	Ad	0,16	Bc	26,4	Aa
L509	29,5	Ab	30,7	Aa	1,45	Ab	1,47	Aa	0,25	Ac	0,18	Bc	20,7	Ab
L54	25,8	Ab	29,7	Aa	1,26	Ab	1,28	Aa	0,21	Ac	0,18	Bd	21,2	Ab
L59	33,6	Ab	32,5	Aa	1,20	Ab	1,22	Aa	0,17	Ac	0,16	Ae	28,5	Aa
L61	28,8	Ab	36,2	Aa	1,48	Ab	1,37	Aa	0,25	Ad	0,15	Bc	20,7	Bb
L63	30,6	Ab	32,1	Aa	1,41	Ab	1,17	Aa	0,22	Ac	0,17	Bd	22,1	Bb
L65	35,2	Ab	35,6	Aa	1,28	Ab	1,12	Aa	0,20	Ad	0,15	Bd	28,2	Aa
L655	29,8	Ab	32,7	Aa	1,43	Ab	1,23	Aa	0,25	Ac	0,17	Bc	21,4	Bb
L684	23,2	Ab	26,5	Aa	0,97	Ab	0,99	Aa	0,20	Ac	0,17	Bd	24,4	Ab
L688	28,6	Ab	34,9	Aa	1,52	Ab	1,29	Aa	0,22	Ad	0,15	Bd	19,4	Bb
L691	29,0	Ab	33,4	Aa	1,28	Ab	1,29	Aa	0,22	Ad	0,15	Bd	23,4	Ab
L693	24,0	Ab	30,4	Aa	1,23	Ab	1,38	Aa	0,25	Ac	0,17	Bc	21,3	Ab
L71	35,9	Ab	36,8	Aa	1,22	Ab	1,26	Aa	0,19	Ad	0,15	Be	31,1	Aa
L75	32,5	Ab	32,7	Aa	1,42	Ab	1,39	Aa	0,21	Ac	0,16	Bd	23,6	Ab
L76	26,9	Ab	30,6	Aa	1,29	Ab	1,29	Aa	0,27	Ab	0,21	Bb	21,6	Ab
P2	34,4	Ab	37,3	Aa	1,29	Ab	1,24	Aa	0,16	Ad	0,14	Ae	27,6	Aa
P3	35,9	Ab	35,7	Aa	5,20	Aa	1,33	Ba	0,16	Ad	0,14	Ae	26,8	Aa
P4	27,9	Ab	31,5	Aa	1,46	Ab	1,32	Aa	0,22	Ac	0,17	Bd	20,0	Ab
P6	34,4	Ab	33,7	Aa	1,24	Ab	1,29	Aa	0,18	Ac	0,16	Ae	28,9	Aa
P7	31,2	Ab	34,9	Aa	1,25	Ab	1,11	Aa	0,19	Ad	0,15	Be	25,7	Ba
P8	32,3	Ab	35,2	Aa	1,36	Ab	1,20	Aa	0,18	Ac	0,16	Ae	24,2	Bb

CHL – conteúdo foliar de clorofila ($\mu\text{g cm}^{-2}$); FLAV – conteúdo foliar de flavonoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$); ANTH – conteúdo foliar de antocianina ($\mu\text{g cm}^{-2}$); e NBI – índice do balanço de nitrogênio.

Tabela 12. Agrupamento univariado de quarenta linhagens de milho-pipoca para características fisiológicas avaliadas em DAS3 (dezesseis dias após a suspensão da irrigação) sob cultivo em condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada).

Linhagem	CHL3				FLAV3				ANTH3				NBI3			
	WS		WW		WS		WW		WS		WW		WS		WW	
L203	33,3	Ab	31,6	Ac	1,20	Bd	1,44	Aa	0,24	Ac	0,26	Aa	35,7	Aa	22,5	Bc
L204	25,6	Bc	32,0	Ac	1,29	Ad	1,40	Aa	0,27	Ab	0,22	Bb	20,5	Ac	23,5	Ac
L217	35,7	Aa	37,3	Ab	1,32	Ad	1,33	Ab	0,24	Ad	0,22	Ab	28,2	Ab	28,8	Ab
L220	32,4	Ab	33,1	Ac	1,31	Ad	1,17	Ab	0,23	Ad	0,23	Ab	25,2	Ab	29,8	Ab
L263	30,5	Bb	37,6	Ab	1,35	Ac	1,27	Ab	0,26	Ac	0,22	Bb	23,2	Bc	31,2	Aa
L273	37,6	Aa	39,9	Aa	1,28	Ad	1,23	Ab	0,22	Ad	0,21	Ab	29,7	Aa	33,8	Aa
L291	38,8	Aa	42,3	Aa	1,49	Ab	1,34	Ab	0,21	Ad	0,20	Ab	26,7	Bb	32,2	Aa
L292	41,0	Aa	39,7	Aa	1,39	Ac	1,36	Aa	0,21	Ad	0,21	Ab	30,0	Aa	30,3	Aa
L294	33,6	Ab	36,4	Ab	1,11	Be	1,36	Aa	0,23	Ad	0,22	Ab	31,4	Aa	27,1	Ab
L321	37,2	Aa	34,3	Ab	1,73	Aa	1,69	Aa	0,23	Ad	0,23	Ab	21,7	Ac	20,7	Ac
L324	27,7	Ac	30,2	Ac	1,42	Ac	1,48	Aa	0,26	Ac	0,25	Aa	20,1	Ac	20,6	Ac
L332	33,7	Ab	38,0	Ab	1,41	Ac	1,45	Aa	0,25	Ac	0,22	Bb	24,1	Ac	27,9	Ab
L358	22,9	Ad	26,9	Ad	1,32	Ad	1,42	Aa	0,27	Ab	0,26	Aa	17,8	Ac	19,2	Ac
L381	30,7	Ab	30,2	Ac	1,43	Ac	1,42	Aa	0,26	Ac	0,25	Aa	22,0	Ac	21,5	Ac
L382	20,4	Bd	26,9	Ad	1,39	Ac	1,38	Aa	0,32	Aa	0,27	Ba	15,1	Ac	20,3	Ac
L386	22,7	Bd	30,6	Ac	1,28	Ad	1,37	Aa	0,30	Ab	0,24	Ba	18,2	Ac	22,7	Ac
L391	29,0	Bc	34,2	Ab	1,55	Ab	1,50	Aa	0,25	Ac	0,23	Ab	19,2	Ac	23,9	Ac
L472	29,6	Bc	36,9	Ab	1,44	Ac	1,22	Bb	0,23	Ad	0,21	Ab	20,8	Bc	31,2	Aa
L501	31,0	Bb	38,7	Aa	1,28	Ad	1,22	Ab	0,25	Ac	0,22	Bb	25,2	Bb	32,7	Aa
L507	31,4	Bb	40,3	Aa	1,37	Ac	1,24	Ab	0,25	Ac	0,20	Bb	24,0	Bc	33,1	Aa
L509	29,2	Ac	34,2	Ab	1,47	Ac	1,56	Aa	0,25	Ac	0,23	Aa	20,6	Ac	22,7	Ac
L54	26,2	Ac	26,1	Ad	1,36	Ac	1,42	Aa	0,27	Ab	0,25	Aa	19,9	Ac	19,4	Ac
L59	32,4	Ab	33,2	Ac	1,36	Ac	1,32	Ab	0,23	Ad	0,23	Ab	24,2	Ac	26,1	Ac
L61	32,7	Ab	35,4	Ab	1,49	Ab	1,50	Aa	0,24	Ad	0,24	Aa	22,3	Ac	24,3	Ac
L63	34,3	Ab	34,4	Ab	1,25	Ad	1,34	Ab	0,23	Ad	0,22	Ab	28,2	Ab	26,5	Ab
L65	37,5	Aa	36,7	Ab	1,22	Ad	1,25	Ab	0,22	Ad	0,22	Ab	31,6	Aa	30,9	Aa
L655	31,0	Ab	35,4	Ab	1,40	Ac	1,27	Ab	0,26	Ac	0,22	Bb	22,7	Bc	28,3	Ab
L684	22,7	Bd	28,4	Ad	1,02	Be	1,19	Ab	0,28	Ab	0,23	Ba	22,6	Ac	24,4	Ac
L688	28,9	Bc	36,9	Ab	1,57	Ab	1,51	Aa	0,24	Ac	0,21	Ab	19,0	Bc	25,2	Ac
L691	31,0	Ab	36,0	Ab	1,32	Ad	1,27	Ab	0,24	Ad	0,21	Ab	24,0	Ac	29,2	Ab
L693	25,7	Bc	32,1	Ac	1,20	Bd	1,49	Aa	0,26	Ac	0,24	Aa	22,4	Ac	22,1	Ac
L71	38,0	Aa	41,5	Aa	1,39	Ac	1,30	Ab	0,24	Ad	0,20	Bb	27,6	Bb	33,2	Aa
L75	32,3	Ab	36,0	Ab	1,51	Ab	1,40	Aa	0,24	Ac	0,24	Aa	22,1	Ac	27,1	Ab
L76	26,0	Bc	33,2	Ac	1,37	Ac	1,27	Ab	0,32	Aa	0,27	Ba	19,2	Bc	26,9	Ab
P2	36,3	Aa	33,1	Ac	1,44	Ac	1,45	Aa	0,23	Ad	0,23	Ab	26,1	Ab	23,5	Ac
P3	37,0	Aa	37,8	Ab	1,45	Ac	1,45	Aa	0,21	Ad	0,21	Ab	26,1	Ab	26,8	Ab
P4	30,4	Ab	34,4	Ab	1,44	Ac	1,37	Aa	0,25	Ac	0,24	Aa	22,1	Ac	26,0	Ac
P6	36,3	Aa	36,7	Ab	1,28	Ad	1,38	Aa	0,22	Ad	0,21	Ab	28,7	Ab	27,5	Ab
P7	31,5	Ab	35,6	Ab	1,30	Ad	1,31	Ab	0,25	Ac	0,21	Bb	24,6	Ac	28,1	Ab
P8	34,6	Ab	34,3	Ab	1,38	Ac	1,41	Aa	0,23	Ad	0,21	Ab	25,7	Ab	24,7	Ac

CHL – conteúdo foliar de clorofila ($\mu\text{g cm}^{-2}$); FLAV – conteúdo foliar de flavonoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$); ANTH – conteúdo foliar de antocianina ($\mu\text{g cm}^{-2}$); e NBI – índice do balanço de nitrogênio.

Para a variável CHL3, houve a reunião das linhagens em quatro grupos de médias para ambas as condições hídricas impostas, com destaque para L292, L291, L71, L273, L65, L217, L321, P3, P2 e P6 (Tabela 12). FLAV3 proporcionou a formação de dois grupos sob irrigação plena e cinco grupos sob déficit hídrico, com proeminência de L321, L391, L75, L61, L291, L509, P3, P4 e P2 para ambas as condições hídricas (Tabela 12). Quanto a ANTH3, foram identificados dois grupos sob irrigação plena e quatro grupos sob estresse hídrico. As linhagens com os maiores valores médios em ambos os ambientes, foram: L54, L382, L76, L386, L684, L204, L358, L381, L693 e L332 (Tabela 12). Por sua vez, NBI3 possibilitou a formação de três grupos para ambas as condições hídricas, com supremacia das linhagens L203, L65, L294, L292, L273, P6, L217, L63, L71 e L501 (Tabela 12).

Em alusão à variável CHL4, foram formados três grupos de médias sob condição de irrigação plena (WW) e quatro grupos sob déficit hídrico (WS). Considerando-se os ambientes (WS e WW) em conjunto, sobressaíram-se as linhagens L65, P3, L292, L71, L203, L273, P8, L75, L220, L691 e L321, por suas médias mais elevadas em WS e por também apresentarem bom desempenho sob WW (Tabela 13).

A variável FLAV4 estabeleceu a formação de dois grupos de médias sob WW e quatro sob WS. As linhagens que mais se destacaram sob WS, apresentando também altas médias sob WW, foram: L273, L321, L688, L507, L509, L391, P3, P8, L54 e L263 (Tabela 13).

ANTH4 propiciou a constituição de três grupos de médias tanto sob condição de irrigação plena quanto sob déficit hídrico. As linhagens com os maiores valores sob WS, que também apresentaram médias expressivas sob WW, foram: L382, L684, L204, L324, L358, L76, L509, L71, L263 e L386 (Tabela 13).

Por fim, para a variável NBI4, foram identificados dois grupos sob WW e cinco grupos sob WS. As linhagens com os maiores valores sob déficit hídrico, associando também bom desempenho sob irrigação plena, foram: L65, L203, L291, L294, L292, L220, L691, L75, P3 e L63 (Tabela 13).

Tabela 13. Agrupamento univariado de quarenta linhagens de milho-pipoca para características fisiológicas avaliadas em DAS4 (vinte e dois dias após a suspensão da irrigação) sob cultivo em condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada).

Linhagem	CHL4				FLAV4				ANTH				NBI			
	WS		WW		WS		WW		WS		WW		WS		WW	
L203	37,8	Aa	32,3	Ab	1,18	Bd	1,41	Aa	0,23	Ac	0,25	Ac	32,6	Ab	23,6	Bb
L204	24,1	Ad	29,9	Ab	1,32	Ac	1,45	Aa	0,30	Aa	0,24	Bc	18,7	Ae	21,3	Ab
L217	34,6	Ab	39,5	Aa	1,30	Ac	1,27	Ab	0,24	Ac	0,21	Ac	27,3	Ac	31,5	Aa
L220	35,8	Ab	36,8	Aa	1,26	Ac	1,27	Ab	0,23	Ac	0,23	Ac	29,3	Ac	29,2	Aa
L263	30,1	Ac	35,7	Aa	1,36	Ab	1,32	Ab	0,27	Ab	0,24	Ac	23,6	Ad	28,3	Aa
L273	36,9	Aa	36,7	Aa	1,48	Ab	1,34	Ab	0,23	Ac	0,22	Ac	25,7	Ac	28,2	Aa
L291	41,3	Aa	43,4	Aa	1,30	Ac	1,43	Aa	0,21	Ac	0,20	Ac	32,6	Ab	31,2	Aa
L292	38,7	Aa	40,3	Aa	1,29	Ac	1,45	Aa	0,26	Ac	0,21	Bc	30,8	Ab	28,5	Aa
L294	33,4	Ab	37,6	Aa	1,11	Bd	1,37	Ab	0,24	Ac	0,23	Ac	32,0	Ab	28,0	Aa
L321	34,8	Ab	31,8	Ab	1,71	Aa	1,67	Aa	0,24	Ac	0,25	Ac	20,5	Ae	19,4	Ab
L324	24,6	Ad	29,5	Ab	1,39	Ab	1,54	Aa	0,30	Aa	0,27	Ac	18,8	Ae	19,4	Ab
L332	34,5	Ab	36,6	Aa	1,35	Ab	1,43	Aa	0,24	Ac	0,24	Ac	26,5	Ac	26,2	Aa
L358	21,7	Ad	24,2	Ac	1,27	Bc	1,49	Aa	0,30	Aa	0,30	Ab	16,5	Ae	16,6	Ab
L381	32,6	Ab	30,8	Ab	1,40	Ab	1,47	Aa	0,24	Ac	0,25	Ac	23,9	Ad	21,4	Ab
L382	22,7	Ad	24,5	Ac	1,32	Ac	1,45	Aa	0,34	Ba	0,39	Aa	18,0	Ae	17,6	Ab
L386	26,9	Ac	32,6	Ab	1,25	Ac	1,33	Ab	0,27	Ab	0,24	Ac	22,1	Ad	24,8	Aa
L391	28,3	Ac	34,0	Aa	1,42	Ab	1,54	Aa	0,26	Ac	0,24	Ac	20,6	Ae	23,1	Ab
L472	31,1	Ac	36,4	Aa	1,27	Ac	1,36	Ab	0,23	Ac	0,21	Ac	24,8	Ad	27,3	Aa
L501	29,4	Ac	34,7	Aa	1,22	Ac	1,29	Ab	0,26	Ac	0,23	Ac	24,8	Ad	27,5	Aa
L507	27,1	Bc	37,2	Aa	1,43	Ab	1,26	Ab	0,27	Ab	0,22	Bc	20,4	Be	30,8	Aa
L509	26,2	Bc	32,9	Ab	1,43	Bb	1,64	Aa	0,28	Ab	0,25	Ac	19,3	Ae	20,8	Ab
L54	28,6	Ac	29,1	Ab	1,37	Ab	1,44	Aa	0,26	Ac	0,25	Ac	21,0	Ae	20,8	Ab
L59	30,9	Ac	36,1	Aa	1,35	Ab	1,37	Ab	0,26	Ac	0,23	Ac	23,4	Ad	27,6	Aa
L61	29,9	Ac	30,3	Ab	1,28	Bc	1,58	Aa	0,26	Ac	0,27	Ac	23,6	Ad	19,9	Ab
L63	33,6	Ab	32,4	Ab	1,30	Ac	1,32	Ab	0,24	Ac	0,23	Ac	27,7	Ac	25,4	Aa
L65	39,5	Aa	39,5	Aa	1,03	Bd	1,26	Ab	0,21	Ac	0,21	Ac	40,0	Aa	33,0	Ba
L655	32,1	Ab	34,0	Aa	1,30	Ac	1,30	Ab	0,25	Ac	0,24	Ac	25,6	Ac	26,5	Aa
L684	19,9	Ad	25,2	Ac	1,06	Bd	1,27	Ab	0,31	Aa	0,26	Bc	19,4	Ae	20,5	Ab
L688	27,9	Bc	35,0	Aa	1,50	Ab	1,47	Aa	0,26	Ac	0,22	Ac	18,9	Ae	24,7	Aa
L691	34,9	Ab	36,0	Aa	1,25	Ac	1,33	Ab	0,24	Ac	0,22	Ac	29,0	Ac	27,8	Aa
L693	27,0	Bc	33,1	Ab	1,17	Bd	1,53	Aa	0,27	Ab	0,23	Ac	24,0	Ad	22,3	Ab
L71	38,8	Aa	39,3	Aa	1,32	Ac	1,27	Ab	0,28	Ab	0,21	Bc	30,0	Ac	32,5	Aa
L75	36,1	Ab	34,1	Aa	1,30	Ac	1,41	Aa	0,23	Ac	0,24	Ac	28,4	Ac	25,3	Aa
L76	31,0	Ac	29,7	Ab	1,30	Ac	1,37	Ab	0,30	Aa	0,30	Ab	24,7	Ad	22,7	Ab
P2	34,1	Ab	36,0	Aa	1,35	Ab	1,47	Aa	0,22	Ac	0,23	Ac	26,1	Ac	25,2	Aa
P3	39,3	Aa	35,7	Aa	1,42	Ab	1,53	Aa	0,22	Ac	0,22	Ac	28,1	Ac	24,2	Ab
P4	33,6	Ab	34,9	Aa	1,29	Ac	1,42	Aa	0,24	Ac	0,22	Ac	27,1	Ac	25,3	Aa
P6	32,8	Ab	33,0	Ab	1,33	Ab	1,44	Aa	0,25	Ac	0,24	Ac	26,7	Ac	23,5	Ab
P7	32,1	Ab	33,5	Aa	1,34	Ab	1,45	Aa	0,25	Ac	0,23	Ac	24,9	Ad	23,5	Ab
P8	36,8	Aa	34,8	Aa	1,40	Ab	1,43	Aa	0,23	Ac	0,22	Ac	26,8	Ac	25,0	Aa

CHL – conteúdo foliar de clorofila ($\mu\text{g cm}^{-2}$); FLAV – conteúdo foliar de flavonoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$); ANTH – conteúdo foliar de antocianina ($\mu\text{g cm}^{-2}$); e NBI – índice do balanço de nitrogênio.

Tabela 14. Agrupamento univariado de quarenta linhagens de milho-pipoca para características fisiológicas avaliadas em DAS5 (trinta e um dias após a suspensão da irrigação) sob cultivo em condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada).

Linhagem	CHL5				FLAV5				ANTH5				NBI5			
	WS		WW		WS		WW		WS		WW		WS		WW	
L203	31,0	Aa	35,8	Aa	1,32	Ab	1,35	Ac	0,26	Ac	0,25	Ab	23,7	Aa	27,2	Ab
L204	26,6	Ab	31,2	Ab	1,24	Ab	1,34	Ac	0,28	Ac	0,25	Ab	22,1	Aa	24,0	Ac
L217	28,9	Bb	39,4	Aa	1,30	Ab	1,23	Ac	0,28	Ac	0,21	Ab	22,6	Ba	33,4	Aa
L220	31,0	Aa	36,5	Aa	1,34	Ab	1,25	Ac	0,27	Ac	0,23	Ab	23,7	Aa	30,2	Ab
L263	22,1	Ab	26,9	Ab	1,21	Bb	1,42	Ac	0,31	Ab	0,30	Aa	18,2	Ab	20,1	Ac
L273	34,7	Aa	38,8	Aa	1,34	Ab	1,37	Ac	0,23	Ac	0,21	Ab	26,7	Aa	29,6	Ab
L291	35,5	Ba	45,9	Aa	1,42	Aa	1,30	Ac	0,23	Ac	0,18	Ab	25,3	Ba	35,9	Aa
L292	37,1	Aa	41,7	Aa	1,37	Aa	1,32	Ac	0,23	Ac	0,24	Ab	27,8	Aa	32,9	Aa
L294	31,2	Aa	34,6	Aa	1,21	Bb	1,41	Ac	0,24	Ac	0,26	Ab	26,6	Aa	25,3	Ac
L321	35,7	Aa	35,4	Aa	1,60	Aa	1,62	Aa	0,25	Ac	0,23	Ab	22,8	Aa	22,5	Ac
L324	27,9	Ab	27,2	Ab	1,43	Aa	1,55	Ab	0,25	Bc	0,34	Aa	19,8	Ab	18,0	Ac
L332	35,1	Aa	34,2	Aa	1,42	Aa	1,50	Ab	0,25	Ac	0,28	Aa	25,3	Aa	24,1	Ac
L358	19,3	Ab	26,2	Ab	1,37	Aa	1,46	Ab	0,31	Ab	0,28	Aa	14,4	Ab	18,2	Ac
L381	28,2	Ab	29,7	Ab	1,46	Aa	1,54	Ab	0,27	Ac	0,28	Aa	20,1	Ab	20,0	Ac
L382	23,7	Ab	30,0	Ab	1,34	Ab	1,45	Ab	0,39	Aa	0,37	Aa	17,6	Ab	20,1	Ac
L386	18,2	Ab	24,8	Ab	1,18	Bb	1,40	Ac	0,40	Aa	0,31	Ba	13,3	Ab	18,3	Ac
L391	25,6	Ab	30,2	Ab	1,47	Aa	1,64	Aa	0,29	Ac	0,25	Ab	18,0	Ab	18,6	Ac
L472	27,2	Bb	35,7	Aa	1,42	Aa	1,38	Ac	0,25	Ac	0,21	Ab	19,4	Ab	26,2	Ab
L501	18,6	Bb	30,2	Ab	1,34	Ab	1,29	Ac	0,40	Aa	0,31	Ba	14,7	Bb	24,5	Ac
L507	25,6	Ab	30,8	Ab	1,36	Ab	1,38	Ac	0,30	Ab	0,27	Ab	19,3	Ab	24,8	Ac
L509	22,6	Ab	26,4	Ab	1,52	Ba	1,72	Aa	0,31	Ab	0,28	Aa	15,0	Ab	15,6	Ac
L54	23,2	Ab	30,5	Ab	1,41	Aa	1,41	Ac	0,30	Ab	0,27	Aa	16,8	Ab	22,4	Ac
L59	26,3	Bb	37,0	Aa	1,39	Aa	1,28	Ac	0,32	Ab	0,23	Bb	19,7	Bb	29,2	Ab
L61	24,6	Ab	28,5	Ab	1,51	Aa	1,55	Ab	0,32	Ab	0,32	Aa	16,8	Ab	18,8	Ac
L63	33,4	Aa	33,4	Aa	1,27	Ab	1,33	Ac	0,23	Ac	0,25	b	27,6	Aa	26,3	Ab
L65	35,5	Aa	41,6	Aa	1,25	Ab	1,20	Ac	0,23	Ac	0,21	Ab	29,3	Aa	35,9	Aa
L655	24,8	Bb	33,1	Aa	1,43	Aa	1,38	Ac	0,30	Ab	0,25	Ab	18,1	Ab	24,5	Ac
L684	17,5	Ab	25,4	Ab	1,01	Bb	1,20	Ac	0,34	Ab	0,27	Aa	17,7	Ab	21,8	Ac
L688	25,8	Bb	37,2	Aa	1,62	Aa	1,52	Ab	0,28	Ac	0,21	Ab	16,4	Bb	25,8	Ac
L691	24,4	Ab	31,3	Ab	1,23	Ab	1,36	Ac	0,26	Ac	0,24	Ab	19,4	Ab	23,6	Ac
L693	21,9	Bb	33,1	Aa	1,28	Ab	1,45	Ab	0,30	Ab	0,24	Ab	17,1	Ab	23,3	Ac
L71	33,7	Aa	36,4	Aa	1,24	Ab	1,37	Ac	0,30	Ab	0,28	Aa	28,5	Aa	28,1	Ab
L75	28,3	Bb	38,6	Aa	1,51	Aa	1,43	Ac	0,27	Ac	0,23	Ab	19,0	Bb	27,7	Ab
L76	25,2	Ab	28,0	Ab	1,38	Aa	1,45	Ab	0,34	Ab	0,33	Aa	18,9	Ab	20,3	Ac
P2	32,1	Aa	36,5	Aa	1,43	Aa	1,35	Ac	0,28	Ac	0,22	Ab	22,6	Aa	27,9	Ab
P3	35,6	Aa	37,9	Aa	1,57	Aa	1,52	Ab	0,24	Ac	0,29	Aa	23,6	Aa	26,9	Ab
P4	28,3	Ab	33,6	Aa	1,33	Ab	1,41	Ac	0,34	Ab	0,33	Aa	22,9	Aa	25,4	Ac
P6	28,3	Ab	35,8	Aa	1,33	Ab	1,34	Ac	0,31	Ab	0,25	Ab	22,2	Aa	28,1	Ab
P7	30,1	Aa	34,5	Aa	1,39	Aa	1,43	Ac	0,27	Ac	0,24	Ab	23,0	Aa	24,8	Ac
P8	33,7	Ba	42,8	Aa	1,42	Aa	1,32	Ac	0,24	Ac	0,20	Ab	24,4	Ba	33,8	Aa

CHL – conteúdo foliar de clorofila ($\mu\text{g cm}^{-2}$); FLAV – conteúdo foliar de flavonoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$); ANTH – conteúdo foliar de antocianina ($\mu\text{g cm}^{-2}$); e NBI – índice do balanço de nitrogênio.

Em referência a CHL5, houve a formação de dois grupos de médias sob irrigação plena (WW) e dois grupos sob déficit hídrico (WS) e, para esses ambientes em conjunto, o destaque recaiu para com as linhagens L292, P3, L291, L65, L321, L332, L273, L71, P2 e P7. Para a característica FLAV5, foram identificados três grupos de médias sob irrigação plena e dois grupos sob déficit hídrico, com diferenciação favorável em ambos esses ambientes das linhagens L688, L321, P3, L509, L61, L75, L391, L381, L655 e L324 (Tabela 14).

Em citação à variável ANTH5, dois grupos foram constituídos sob irrigação plena e três grupos sob déficit hídrico. As linhagens com maiores médias sob WS, que também se destacaram sob irrigação plena, foram: L386, L501, L382, L684, L76, P4, L358, P6, L59 e L61 (Tabela 14).

Em atinência a NBI5, foram formados três grupos de médias sob irrigação plena e dois sob déficit hídrico. Sobressaíram-se as linhagens L65, L71, L292, L63, L273, L294, L291, L332, P8 e L220, por deterem as maiores estimativas de médias sob WS, bem como bom desempenho também sob WW (Tabela 14).

Com base nas estimativas de médias para as variáveis relacionadas aos pigmentos foliares (CHL, FLAV, ANTH e NBI), é possível destacar as linhagens com melhor desempenho sob estresse hídrico (WS) e que também mantiveram bons resultados sob irrigação plena (WW). Trata-se de genótipos com maior estabilidade e tolerância ao déficit hídrico. Nesse aspecto, L292, L291, L71, L273, L65, L321, P2, P3, L217 e L381 foram as elencadas como as dez mais promissoras, por expressarem os melhores desempenhos médios para múltiplas características fisiológicas sob condições tanto de irrigação plena quanto de déficit hídrico. Tem-se, por conseguinte, um rol de genótipos com perspectiva de utilização em programas de melhoramento genético no intento de obtenção de segregantes superiores em gerações avançadas sob seleção populacional, ou, mesmo, para a geração de híbridos superiores em estratégias de intercruzamentos, como dialelos e *testcrosses*.

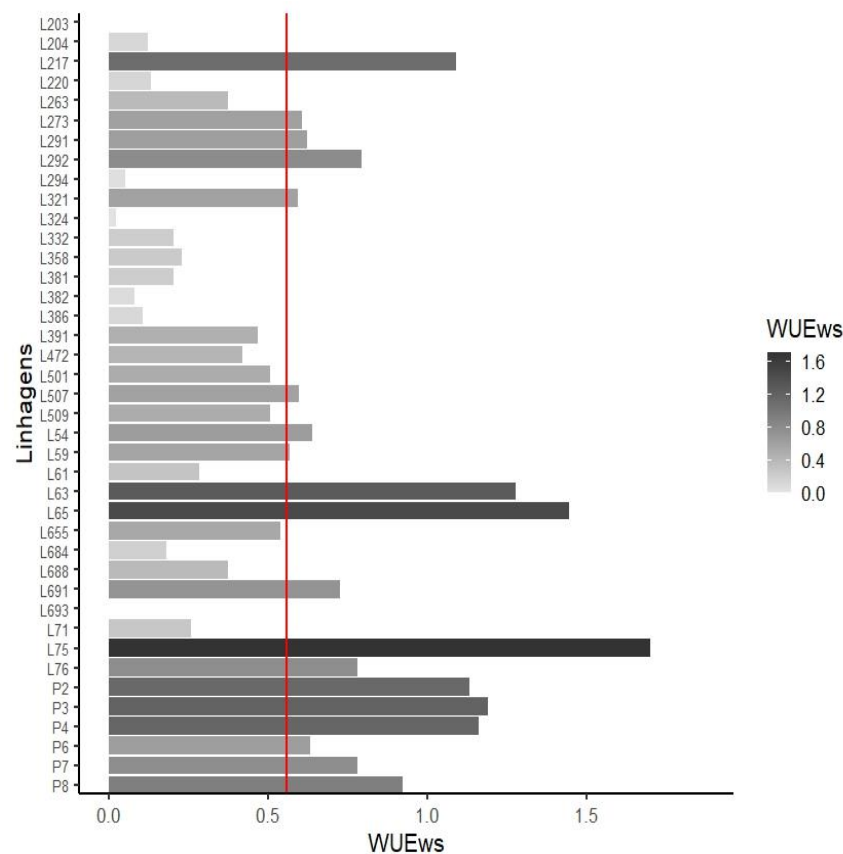
5.5 Performance genotípica via eficiência agronômica no uso da água e tolerância ao estresse hídrico

A estimativa da eficiência agronômica no uso da água (WUE, do inglês *water use efficiency*) é essencial para determinar o desempenho produtivo das plantas em relação à quantidade de água disponível sob condições de déficit hídrico (Kamara et

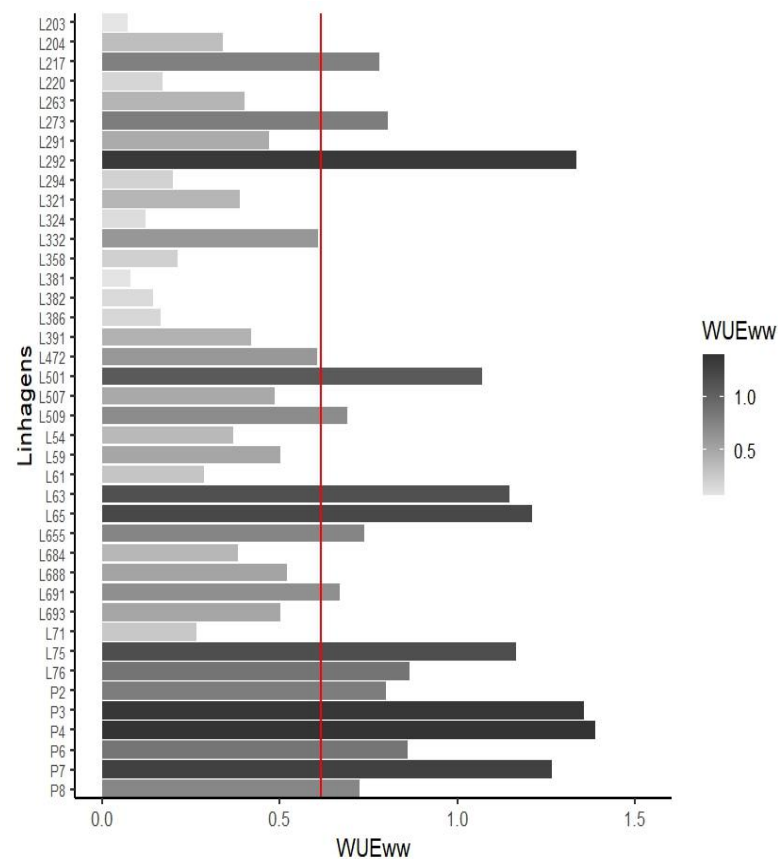
al., 2003; Zia et al., 2013). WUE expressa a relação entre a produtividade agrônômica e o volume total de água disponibilizado para as plantas, considerando tanto a irrigação quanto a precipitação (Tambussi et al., 2007; Jákli et al., 2018).

Dessa forma, permite avaliar a capacidade de conversão da água em biomassa ou grãos, sendo um estimador fundamental na seleção de genótipos de milho-pipoca mais eficientes no uso da água (Kamphorst et al., 2018; Leite et al., 2021; Leite et al., 2022; Lamêgo et al., 2024). Estudos como o de Leite et al. (2022) demonstram que genótipos com maior eficiência no uso da água (WUE) tendem a apresentar produtividade mais elevada e estável, mesmo sob condições subótimas de disponibilidade hídrica. Isso se deve a um conjunto de características fisiológicas e morfoagronômicas que favorecem a aclimação das plantas ao estresse hídrico, otimizando o aproveitamento da água disponível.

Para a estimativa da eficiência agrônômica no uso da água (Figuras 5A e 5B), as linhagens que apresentaram as maiores médias em ambas as condições hídricas — superando a média geral de 0,56 em WS e de 0,62 em WW —, foram: L75, P3, P4, L65, L63, P7, P2, L292, L217, L76, P8, P6 e L273. Pode-se aduzir que mesmo com uma redução de aproximadamente 31,30% na quantidade de água aplicada no ambiente com estresse hídrico, algumas linhagens de milho-pipoca demonstraram expressiva produtividade, variando entre 285,99 e 803,03 kg ha⁻¹.



A



B

Figura 5. Gráficos em barras representativas da estimativa da eficiência agrônômica no uso da água (WUE) para quarenta linhagens de milho-pipoca avaliadas em condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada). A tonalidade das barras torna-se progressivamente mais intensa à medida que as estimativas de WUE aumentam. A linha vermelha representa a média de WUE para todas as linhagens (0,558 em WS; 0,615 em WW).

Para a agricultura em geral, o cultivo de genótipos que aliam alta produtividade e uso eficiente da água é essencial para garantir rentabilidade da produção. Para tanto, os programas de melhoramento genético com enfoque na ambientação de descendentes a cultivos em ambientes com déficit hídrico necessitam atuar em parceria com fisiologistas, fitotecnistas e biotecnologistas para a discriminação mais sutil de genitores que reúnam alelos favoráveis para WUE, de modo a permitir a geração de híbridos mais eficientes no uso da água.

No ambiente WS (Figura 5A) as linhagens que apresentaram maior rendimento produtivo e WUE foram: L75 (803,00 kg ha⁻¹), L65 (682,70 kg ha⁻¹), L63 (604,20 kg ha⁻¹), P3 (562,50 kg ha⁻¹), P2 (534,10 kg ha⁻¹), L217 (515,10 kg ha⁻¹) e P8 (435,60 kg ha⁻¹), por apresentarem rendimentos superiores ou próximos à média geral (491,14 kg ha⁻¹); portanto, com maior eficiência na produção de grãos por unidade de água aplicada durante a condução do presente estudo.

Há de se destacar que, mesmo sob uma redução aproximada de 31,30% na quantidade de água aplicada, essas linhagens demonstraram elevado potencial produtivo aliado a uma boa adaptação às condições de estresse hídrico, sendo, por conseguinte, indicadas como as mais promissoras para compor genealogias para geração de híbridos ou para obtenção de segregantes superiores; ambas estratégias com vistas à disponibilização de genótipos para cultivo comercial em ambientes com parca disponibilidade hídrica.

No ambiente com estresse hídrico (WS), as linhagens consideradas "boas", ou seja, aquelas que apresentaram estimativas do índice de eficiência no uso da água (WUE) acima da média geral (0,558) para a característica RG, foram: P4 (549,24 kg ha⁻¹), L75 (803,00 kg ha⁻¹), L65 (682,70 kg ha⁻¹), L76 (645,83 kg ha⁻¹), P6 (642,04 kg ha⁻¹), L63 (604,20 kg ha⁻¹), L273 (599,43 kg ha⁻¹), P3 (562,50 kg ha⁻¹), P2 (534,10 kg ha⁻¹), L217 (515,10 kg ha⁻¹), L691 (500,00 kg ha⁻¹) e P8 (435,60 kg ha⁻¹). Esses genótipos demonstraram maior capacidade de crescimento relativo sob limitação hídrica, indicando desempenho superior em termos de uso eficiente da água nesse ambiente adverso.

O índice de tolerância ao estresse hídrico (STI, do inglês *stress tolerance index*) é uma métrica utilizada para avaliar o desempenho de genótipos cultivados sob condições de déficit hídrico em comparação com o cultivo em condições adequadas de irrigação (Fernandes, 1992; Abd El-Rady e Koubisy, 2023). Esse índice é um critério que auxilia na identificação de plantas que mantêm altos níveis

de produtividade mesmo sob estresse, favorecendo a seleção de genótipos mais adaptados a ambientes com baixa disponibilidade de água (Bohnert e Jensen, 1996; Osakabe et al., 2014; Ma et al., 2025). Valores elevados de STI associados a demais características indicam que o genótipo avaliado possui alta produtividade tanto em condições de estresse hídrico quanto em condições ideais de água (Kamphorst et al., 2018). STI é, pois, um estimador útil para determinar o rendimento superior dos genótipos sob estresse e potencial de tolerância.

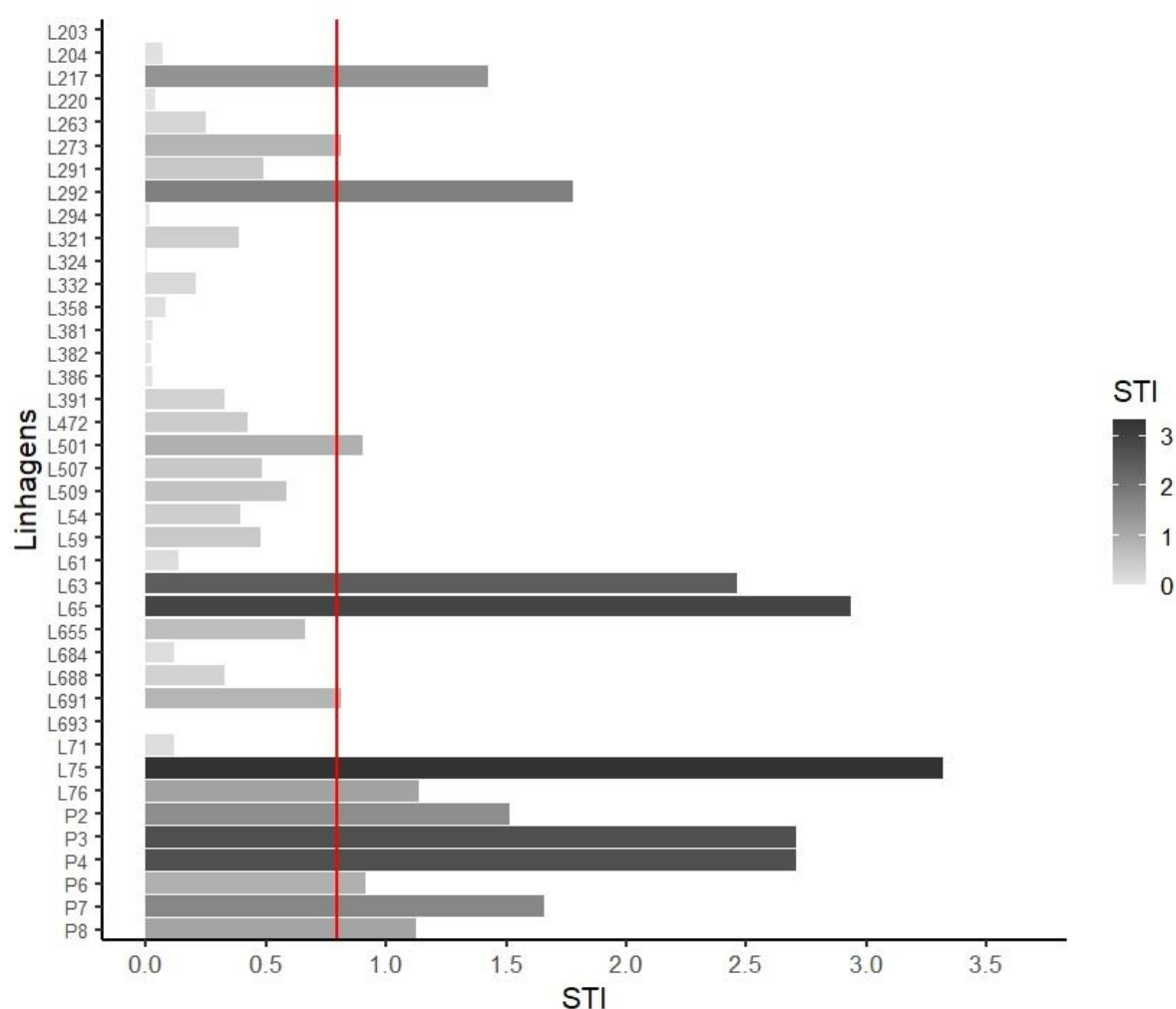


Figura 6. Gráficos em barras representativas da estimativa do índice de tolerância ao estresse hídrico (STI) para quarenta linhagens de milho-pipoca avaliadas em condições hídricas contrastantes (WS – déficit hídrico; e WW – bem irrigada). A tonalidade das barras torna-se progressivamente mais intensa à medida que as estimativas de STI aumentam.

A linha vermelha representa a média de STI para todas as linhagens (0,797).

No presente trabalho, de forma resumida, a estimativa de média de STI foi de 0,797 para RG (Figura 6). Os genótipos superiores foram aqueles que expressaram valores mais elevados que a média geral do índice para RG, quais sejam: L75, que apresentou o maior valor, seguido por L65, P3, L63, L292, P7, P2, L217, L76, P8, L501, P6, L273, L691 e P4, nesta ordem hierárquica.

5.6 Estimativas do coeficiente de correlação de Pearson entre características morfoagronômicas e fisiológicas

A correlação de Pearson é fundamental para compreender as inter-relações entre esses atributos e identificar quais características estão mais associadas ao desempenho produtivo e à adaptação das linhagens (Pearson, 1901; Cruz et al., 2014; Suresh e Raju, 2022). Esse estimador permite detectar variáveis de fácil mensuração que possam ser utilizadas para a seleção indireta em programas de melhoramento, facilitando a identificação de genótipos com superioridade para eficiência no uso da água e produtividade (Gouveia et al., 2024).

Na análise de correlação, o grau das associações entre características pode ser considerado forte quando o coeficiente é superior a 0,70, indicando uma relação linear significativa entre as variáveis. Já uma correlação moderada é frequentemente definida entre 0,40 e 0,70, sugerindo uma associação perceptível, mas não tão intensa. Correlações fracas ocorrem quando os coeficientes são inferiores a 0,40, o que indica uma relação mais tênue entre as variáveis (Hallauer et al., 2010; Cruz et al., 2014). Por fim, quando o coeficiente está próximo de zero, considera-se que as variáveis não estão associadas de forma linear, ou seja, não há uma relação significativa entre elas (Hallauer et al., 2010; Cruz et al., 2014).

Em WS, as estimativas do coeficiente de correlação para com o caractere principal RG foram significativas e de magnitude positiva para DESP (0,75), NGF (0,69), MCG (0,61), CESP (0,48) e NFG (0,40) (Figura 7A). De forma análoga, em WW as associações positivas com RG ocorreram para DESP (0,80), NGF (0,74), CESP (0,69) e MCG (0,46). Isso indica que o aumento em qualquer um desses caracteres em ambas as condições pode resultar em ganhos simultâneos em RG.

Almeida et al. (2024) destacam que o aumento do número de grãos por fileira (NGF) indica um desenvolvimento reprodutivo mais robusto de plantas de milho-pipoca, resultando em maior produtividade por espiga e melhor direcionamento dos

assimilados para os órgãos reprodutivos. Além disso, NGF reflete um crescimento inicial vigoroso e uma diferenciação floral eficiente, evidenciando o potencial genético para altas produtividades.

Em estudo realizado por Kumar et al. (2024), foi identificado que espigas de milho comum mais espessas proporcionam grãos mais pesados e de melhor qualidade, com implicação direta na produtividade. Da mesma forma, o maior comprimento da espiga está relacionado a um desenvolvimento floral mais eficiente e a uma melhor capacidade de enchimento dos grãos. Espigas mais longas, por sua vez, geralmente acomodam um maior número de fileiras e grãos, contribuindo significativamente para o aumento do rendimento da planta (Leite et al., 2022; Oliveira et al., 202).

Para além das características morfoagronômicas avaliadas, a análise de estimativas de correlações com a inclusão de variáveis fisiológicas amplia o espectro de percepção de opções alternativas de fácil mensuração que possam ser utilizadas na seleção indireta. Nesse sentido, detectou-se no presente estudo uma possível seleção com base no conteúdo de clorofila e no índice de balanço de nitrogênio que pode ser capaz de promover ganhos em CESP, DESP, NFG e NGF (e indiretamente ganhos em RG, sendo necessário uma análise de trilha para confirmar esses resultados), uma vez que em WS a avaliação dos pigmentos foliares realizada aos vinte e dois dias após o corte da irrigação (DASI) revelou maiores estimativas de correlação de CHL4 e NBI4 para com caracteres secundários associados à produtividade e, mesmo, RG. Especificamente, em se tratando do conteúdo de clorofila (CHL4) aos 22DASI, observaram-se correlações positivas com NGF (0,53), RG (0,50), DESP (0,49), CESP (0,38) e NFG (0,34).

Já para o índice de balanço de nitrogênio avaliado na mesma época (NBI4), detectaram-se associações positivas para as mesmas características, na ordem de NFG (0,48), DESP (0,48), NGF (0,46), RG (0,42) e CESP (0,35), respectivamente. Além disso, cumpre destacar que a seleção com base nessas características aos 22DASI proporcionou estimativas consideráveis da eficiência agrônômica no uso da água ($WUE \times CHL = 0,50$; e $WUE \times NBI = 0,42$) e da tolerância à seca ($STI \times CHL = 0,49$; $STI \times NBI = 0,48$) (Figura 7A).

Em contrapartida, em WW, a seleção indireta de RG, de modo não-destrutivo, com auxílio da medição de pigmentos foliares, revelou-se mais eficaz quando a avaliação foi realizada aos onze dias após o corte da irrigação, visto que

RG apresentou correlação de 0,46 para com CHL2, de 0,48 para com NBI2, e negativa de magnitude -0,38 para com ANTH2. Isso denota que selecionar plantas com menores valores de antocianina e valores mais elevados de clorofila e do índice de balanço de nitrogênio pode implicar em resultados diretos sobre RG.

Com relação aos caracteres agronômicos secundários, a seleção indireta destes por meio de variáveis fisiológicas estimadas no ambiente WS seria mais provável aos quatro dias após a imposição do estresse hídrico, dadas as associações positivas entre CHL1 para com NGF (0,41) e DESP (0,56), e negativa entre ANTH1 para com NGF (-0,38) e DESP (-0,48). Além disso, a avaliação inicial aos quatro dias após suspensão a irrigação exibiu correlação moderada com a eficiência no uso da água e com o índice de tolerância ao estresse hídrico.

Conclui-se, pois, que a correlação entre os pigmentos foliares e caracteres agronômicos varia conforme a disponibilidade de água. De forma geral, a diferença temporal em magnitudes de estimativas de correlação entre características fisiológicas e morfoagronômicas reforça que o estresse hídrico prolonga o intervalo de tempo necessário para que os efeitos dos pigmentos foliares se vinculem mais fortemente com a produtividade, possivelmente em decorrência de efeitos metabólicos produzidos pela planta às condições adversas (Kamphorst et al., 2020; Carvalho et al., 2023; Oliveira et al., 2024).

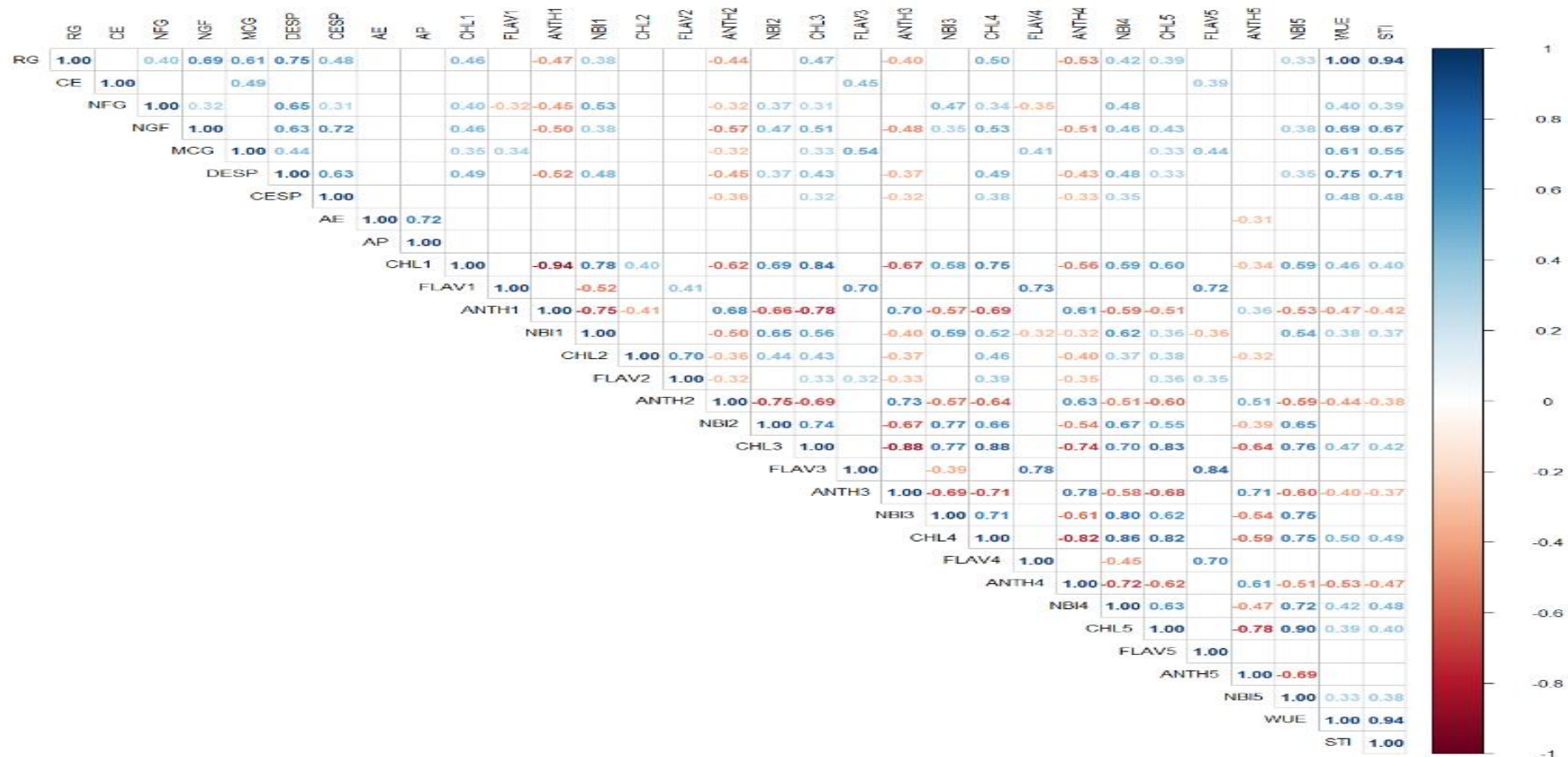


Figura 7. Estimativas do coeficiente de correlação de Pearson entre dezenove variáveis morfoagronômicas e fisiológicas avaliadas em quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas sob condição de déficit hídrico (WS). Os espaços em branco indicam valores de correlações não significativos ($p > 0,05$). A barra de cores representa a magnitude e a direção das correlações, em que: a) valores positivos são destacados em azul, b) valores negativos são destacados em vermelho, e c) tonalidades mais intensas indicam estimativas de correlações mais elevadas.

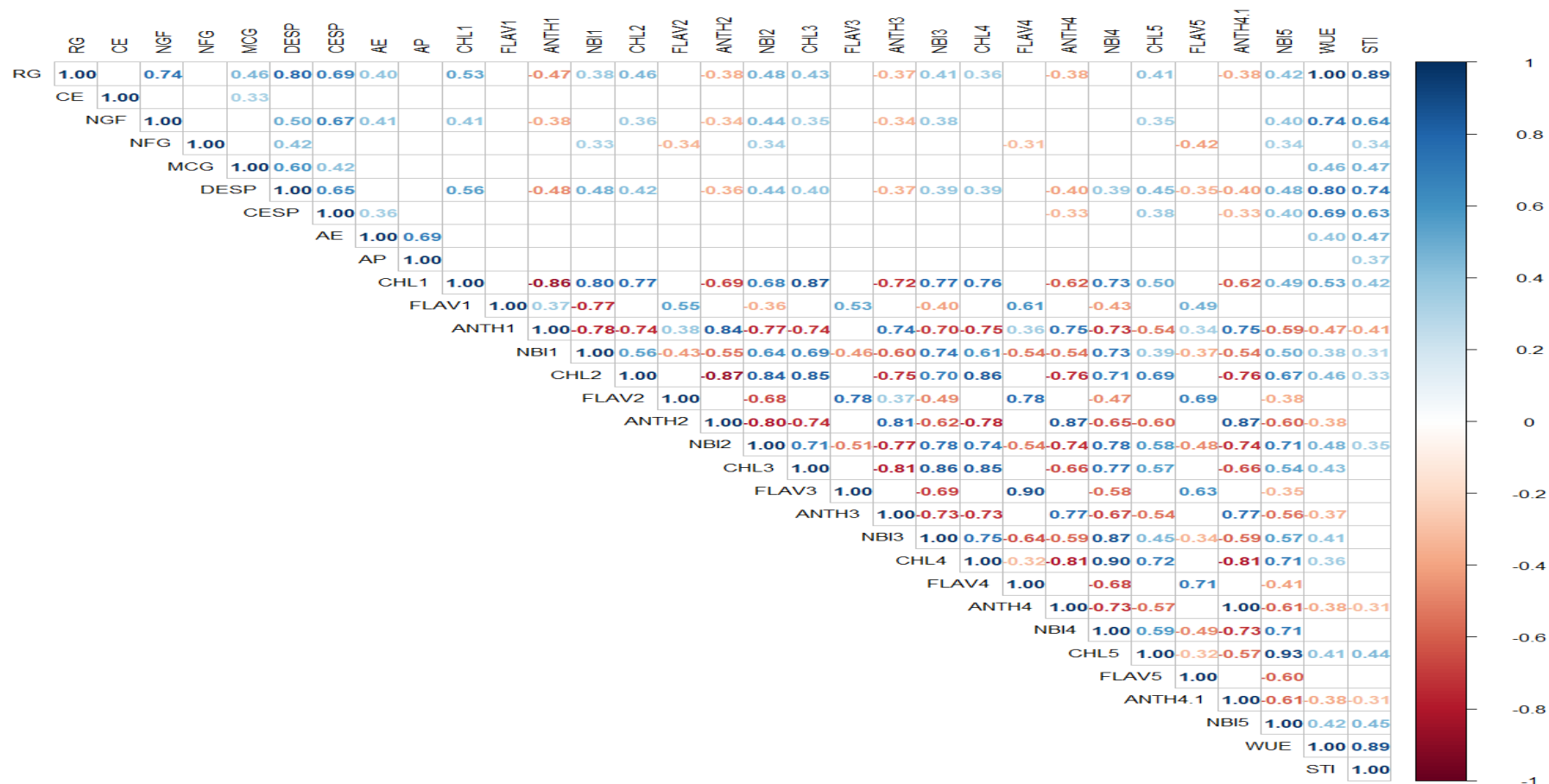


Figura 8. Estimativas do coeficiente de correlação de Pearson entre dezenove variáveis morfoagronômicas e fisiológicas avaliadas em quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas sob condição bem irrigada (WW). Os espaços em branco indicam valores de correlações não significativos ($p > 0,05$). A barra de cores representa a magnitude e a direção das correlações, em que: a) valores positivos são destacados em azul, b) valores negativos são destacados em vermelho, e c) tonalidades mais intensas indicam estimativas de correlações mais elevadas.

Juntos, esses resultados denotam que os genótipos com maior manutenção de clorofila e maior balaço no índice de nitrogênio foram os que possivelmente tiveram uma melhor capacidade fotossintética e maior eficiência no uso dos recursos disponíveis durante o período de estresse hídrico. Isso indica que a preservação da integridade fotossintética nesse estágio crítico do desenvolvimento pode ter contribuído para a assimilação de carbono e, conseqüentemente, para um melhor enchimento de grãos, resultando em maior produtividade mesmo sob condições de déficit hídrico, conforme propalado por Taiz e Zong (2024).

O conteúdo foliar de clorofila, ou *stay-green*, é um indicador fundamental da capacidade fotossintética das plantas e pode ser determinante na seleção de genótipos de milho-pipoca mais adaptados ao déficit hídrico (Taiz e Zeiger, 2024). Genótipos que mantêm altos níveis de clorofila durante períodos de seca apresentam maior eficiência na conversão de luz em energia, favorecendo o crescimento e a manutenção da produtividade (Sharma et al., 2015; Negi et al., 2020; Shomali et al., 2023). Além disso, a preservação da clorofila sob estresse minimiza danos oxidativos e garante maior resiliência fisiológica, possibilitando uma recuperação mais rápida das plantas quando as condições hídricas se tornam favoráveis (Taiz e Zeiger, 2024).

5.7 Dispersão GT *Biplot*

No que se refere à análise GT *Biplot*, o percentual acumulado dos dois primeiros componentes principais reflete a capacidade do gráfico em representar, de forma confiável, a variação total no desempenho dos genótipos com base nas características avaliadas. Quando esses componentes explicam mais de 60,00% da variação total, a representação gráfica é considerada satisfatória em termos de confiabilidade (Yan et al., 2002). Nesse trabalho, os dois primeiros componentes principais explicaram 56,06% da variação total no ambiente com déficit hídrico (WS) (Figura 9A). Já no ambiente com irrigação plena (WW), esses componentes responderam por 59,37% da variação total das características analisadas (Figura 9B). Os percentuais explicativos da variação total pelos dois primeiros componentes principais, embora não tenham sido expressivos no presente trabalho, foram próximos ao valor de 60,00%; portanto, ainda assim julgados representativos para a extração de informações científicas.

Na análise *Biplot* “Which-won-Where”, os genótipos posicionados nos vértices do gráfico representam os melhores desempenhos em uma ou mais características avaliadas, devido à sua maior distância em relação à origem da figura (Royo et al., 2020). Trata-se de uma análise visual que permite identificar quais genótipos se destacam positiva ou negativamente em relação às características analisadas. Essa abordagem facilita não apenas a identificação dos genótipos superiores, mas também evidencia as características de maior influência, otimizando o processo de seleção e o direcionamento dos programas de melhoramento genético.

No ambiente sob estresse hídrico (WS), observou-se a formação de cinco grupos distintos com base nas variáveis estudadas (Figura 8A). O primeiro grupo foi composto pelo conteúdo foliar de flavonoides (FLAV1, FLAV3, FLAV4 e FLAV5) e pela massa de cem grãos (MCG). De forma semelhante, o segundo grupo reuniu as variáveis conteúdo foliar de flavonoides (FLAV2), conteúdo foliar de clorofila (CHL2 e CHL5), índice de eficiência no uso da água (WUE) e altura de planta (AP).

O terceiro grupo incluiu o conteúdo foliar de clorofila (CHL3 e CHL4), o número de grãos por fileira (NGF), o índice de tolerância ao estresse hídrico (STI) e o comprimento de espiga (CESP). Por sua vez, o quarto grupo foi constituído pelas variáveis conteúdo foliar de clorofila (CHL1), diâmetro de espiga (DESP), índice de balanço de nitrogênio (NBI1, NBI2, NBI3, NBI4 e NBI5) e número de fileiras de grãos por espiga (NGF).

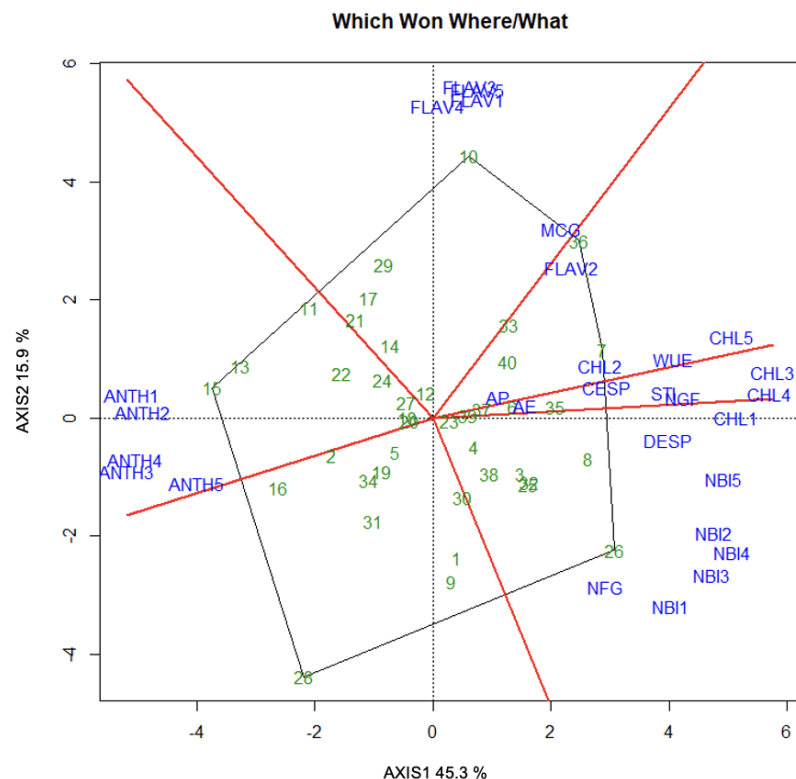
Por fim, o quinto grupo abrangeu as características relacionadas ao conteúdo foliar de antocianinas (ANTH1, ANTH2, ANTH3, ANTH4 e ANTH5).

Comparando os resultados das estimativas de correlações com os de *Biplot* aqui obtidos, constata-se que houve forte equivalência entre as técnicas analíticas, vez que: a) todas as características reunidas no grupo um do *Biplot* apresentaram correlação de Pearson significativa entre si; b) no grupo dois do *Biplot*, a maioria das variáveis também expressou significância para as estimativas de correlação entre si, com exceção das combinações FLAV2 × AP e FLAV2 × WUE, que não foram estatisticamente significativas; c) todas as características dos grupos três e quatro da técnica *Biplot* apresentaram correlação positiva; e d) as características que compuseram o grupo cinco também revelaram correlação positiva entre si. Tem-se, pois, que essas congruências reforçam a consistência dos agrupamentos *Biplot* formados.

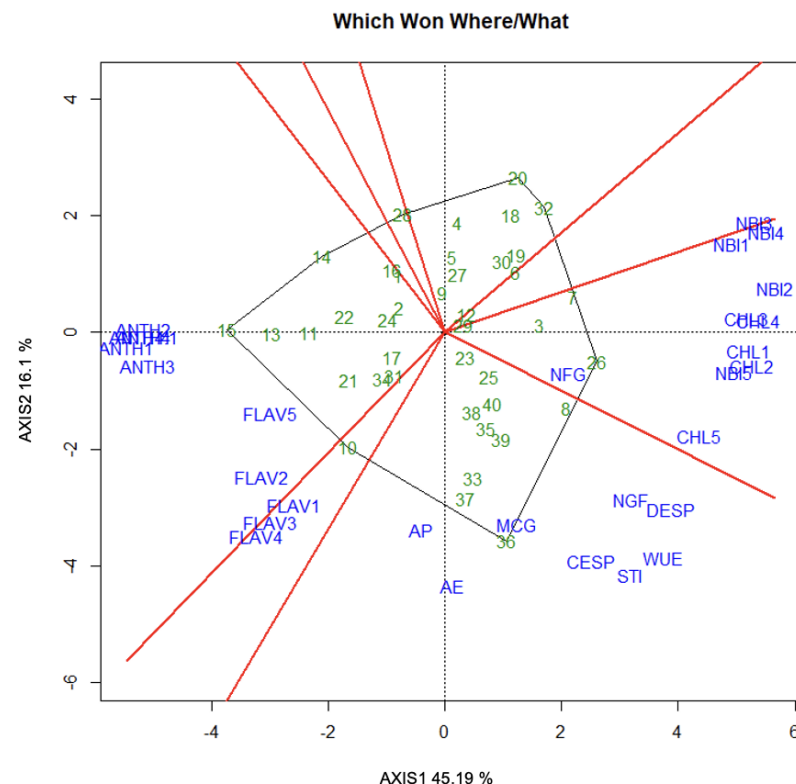
Os genótipos localizados nos vértices do polígono formado no gráfico *Biplot* foram identificados como os mais responsivos às condições avaliadas, sendo, portanto, denominados "genótipos de vértice". No primeiro grupo, o genótipo 10 (L321) se destacou por apresentar os maiores índices foliares de flavonoides. No segundo grupo, os genótipos 36 (P3) e 7 (L291) ocuparam os vértices, o que se deveu aos seus elevados conteúdos foliares de clorofila e flavonoides, além de apresentarem alto índice de eficiência agronômica no uso da água e maior altura de planta.

No terceiro grupo, nenhum genótipo ocupou os vértices do polígono *Biplot*. Já no quarto grupo, o genótipo 26 (L65) foi o destaque, apresentando os maiores valores de conteúdo foliar de clorofila, de diâmetro médio de espiga, de índice de balanço de nitrogênio e de número de fileiras de grãos por espiga. Por fim, no quinto grupo, os genótipos 15 (L382), 13 (L358) e 11 (L324) se sobressaíram, sendo identificados como aqueles com os maiores conteúdos foliares de antocianinas (ANTH1, ANTH2, ANTH3, ANTH4 e ANTH5).

Assim, com vistas à geração de genótipos com adaptação a ambientes com escassez de água, é possível inferir que as linhagens L321, P3, L291, L65, L382, L358 e L324, localizadas próximas ao vértice do polígono, constituem potenciais opções para intercruzamento visando a aumentos no teor de clorofila em seus descendentes.



A



B

Figura 9. Gráfico *Biplot Which-Won-Where* da dispersão de características avaliadas em quarenta linhagens de milho-pipoca avaliadas em condição de (A) déficit hídrico (WS) e (B) de irrigação plena (WW). RG - Rendimento de grãos; CE - Capacidade de expansão; NGF - Número de grãos por fileira; NFG - Número de fileira de grãos; MCG - Massa de 100 grãos; DESP - Diâmetro de espiga; CESP - Comprimento de espiga; AE - Altura de espiga; AP - Altura de planta; CHL - Conteúdo foliar de clorofila; FLAV - Conteúdo foliar de flavonoides; ANTH - Conteúdo foliar de antocianina; NBI - Índice do balanço de nitrogênio; WUE - Eficiência agronômica no uso da água; e STI - Índice de tolerância ao estresse hídrico.

No ambiente com irrigação plena (WW), observou-se a formação de quatro grupos distintos com base nas variáveis analisadas (Figura 8B). O primeiro grupo reuniu o índice de balanço de nitrogênio (NBI1, NBI2, NBI3, NBI4 e NBI5), o conteúdo foliar de clorofila (CHL1, CHL2, CHL3, CHL4 e CHL5) e o número de fileiras de grãos por espiga (NGF). O segundo grupo foi composto pelo número de grãos por fileira (NGF), diâmetro médio de espiga (DESP), eficiência agrônômica no uso da água (WUE), índice de tolerância ao estresse hídrico (STI), comprimento médio de espiga (CESP), massa de cem grãos (MCG), altura de espiga (AE) e altura de planta (AP). O terceiro grupo concentrou as variáveis relacionadas ao conteúdo foliar de flavonoides (FLAV1, FLAV2, FLAV3 e FLAV4). Por fim, o quarto grupo destacou-se por agrupar o conteúdo foliar de flavonoides (FLAV2 e FLAV5) e o conteúdo foliar de antocianinas (ANTH1, ANTH3, ANTH4 e ANTH5).

Os genótipos 7 (L291) e 26 (L65) se destacaram no primeiro grupo de características por ocuparem o vértice do polígono, indicando maior expressividade para o índice de balanço de nitrogênio, conteúdo foliar de clorofila e número de fileiras de grãos por espiga. No segundo grupo, os genótipos 8 (L292) e 36 (P3) posicionaram-se no vértice do polígono, evidenciando os maiores valores para número de grãos por fileira, diâmetro médio de espiga, eficiência agrônômica no uso da água, índice de tolerância ao estresse hídrico, comprimento médio de espiga, massa de cem grãos, altura de espiga e altura de planta. No grupo três, destacou-se o genótipo 10 (L321), por apresentar os maiores valores de conteúdo foliar de flavonoides. Por fim, no grupo quatro, os genótipos 15 (L382) e 14 (L381) se sobressaíram com os maiores teores de flavonoides e antocianinas nas folhas. Os genótipos L65, L292 e P3 apresentaram alta produtividade acompanhada de elevada capacidade de expansão, enquanto os demais genótipos se destacaram apenas pelos elevados valores de capacidade de expansão.

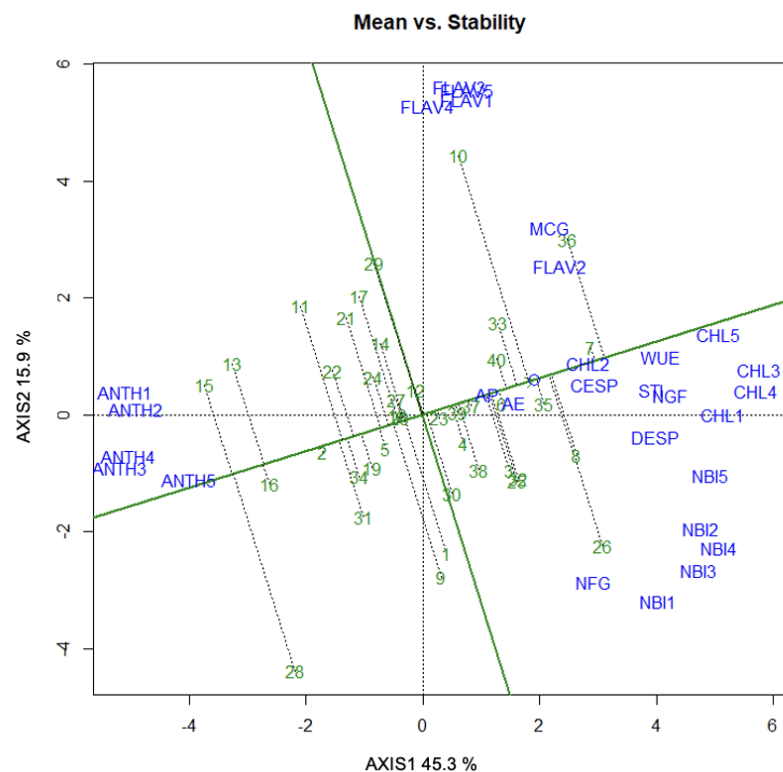
Destaca-se que houve consonância no agrupamento dos genótipos 36 (P3), 26 (L65), 10 (L321) e 15 (L382) nos dois ambientes avaliados (WS e WW), indicando estabilidade e desempenho superior sob diferentes condições hídricas. A linhagem 36 apresentou médias elevadas para caracteres agrônômicos como número de grãos por fileira, massa de cem grãos e altura de planta, enquanto o genótipo 26 (L65) destacou-se por seus altos valores de índice de balanço de nitrogênio e conteúdo foliar de clorofila. O genótipo 10 (L321) manteve-se entre os mais responsivos quanto ao índice de flavonoides, e o genótipo 15 (L382) apresentou consistência no acúmulo de flavonoides e antocianinas. Esses resultados denotam que tais genótipos reúnem atributos fisiológicos e produtivos

desejáveis, sendo potenciais candidatos para uso em programas de melhoramento voltados à adaptação em ambientes contrastantes quanto à disponibilidade hídrica.

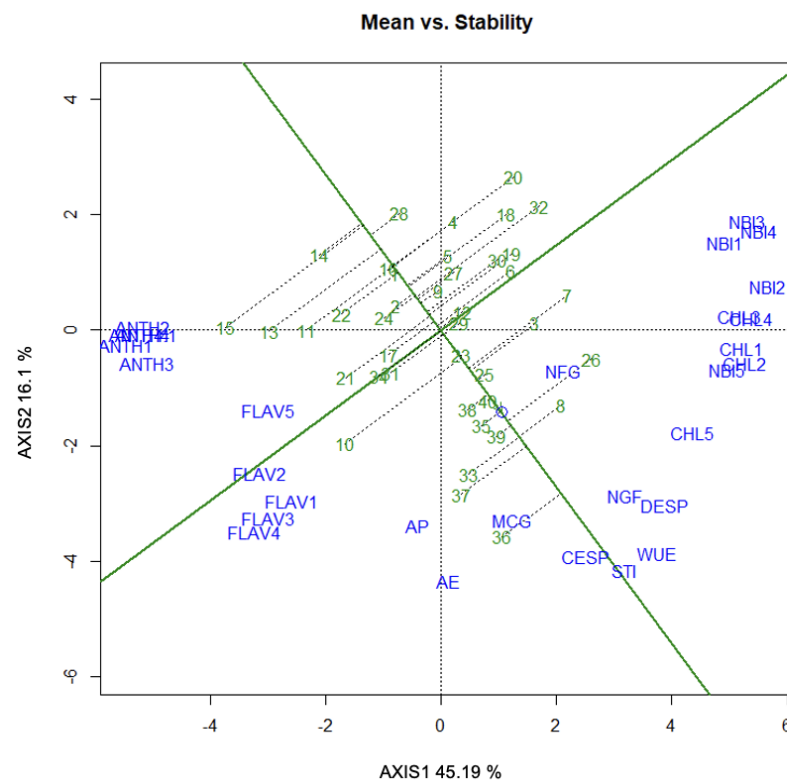
Para interpretar o gráfico de análise *Biplot Means × Stability* (Figuras 9A e 9B), é importante observar dois aspectos principais: o desempenho médio dos genótipos e sua estabilidade em diferentes ambientes. O eixo horizontal (PC1) representa o desempenho médio, em que genótipos mais à direita apresentam maior média para a característica avaliada, como produtividade ou índice fisiológico (Yan, 2001). Já o eixo vertical (PC2) indica a estabilidade, isto é, quanto menor a projeção vertical do genótipo, mais estável é o genótipo. A seta que aponta no sentido do desempenho crescente ajuda a visualizar os genótipos mais desejáveis. Assim, os genótipos localizados mais próximos da seta e com menor distância vertical em relação ao eixo horizontal são considerados superiores, por combinarem alto desempenho com estabilidade.

Dessa forma, os genótipos localizados mais próximos da seta e com menores projeções no gráfico são considerados os mais promissores, por apresentarem médias superiores associadas à boa estabilidade. Destacam-se os genótipos 35 (P2), 33 (L75), 40 (P8), 6 (L273), 37 (P4), 38 (P6), 39 (P7), 4 (L220) e 23 (L59), que demonstraram elevado desempenho médio aliado à consistência sob condições de déficit hídrico, evidenciando o potencial para utilização em programas de intercruzamentos. Em contrapartida, os genótipos 26 (L65), 10 (L321) e 8 (L292) apresentaram estabilidade aceitável, porém com médias relativamente baixas, o que pode limitar seu uso em programas de melhoramento (Figura 9A).

De forma conclusiva, considerando o desempenho dos genótipos analisados, aduz-se que os materiais 35 (P2), 33 (L75), 40 (P8), 6 (L273), 37 (P4), 38 (P8), 39 (P7), 4 (L220) e 23 (L59) reúnem as características desejáveis de alto desempenho médio aliado à boa estabilidade sob condições de déficit hídrico, sendo, portanto, os mais promissores para uso em programas de melhoramento voltados à obtenção de híbridos ou populações segregantes adaptados a ambientes com restrição hídrica. Em contraste, embora os genótipos 26 (L65), 10 (L321) e 8 (L292) tenham demonstrado alta estabilidade, suas médias inferiores para características de interesse limitam seu aproveitamento em programas de melhoramento, exigindo avaliações adicionais *a priori* de possíveis recomendações futuras, caso em novas pesquisas estes venham a exibir resultados discrepantes dos aqui obtidos.



A



B

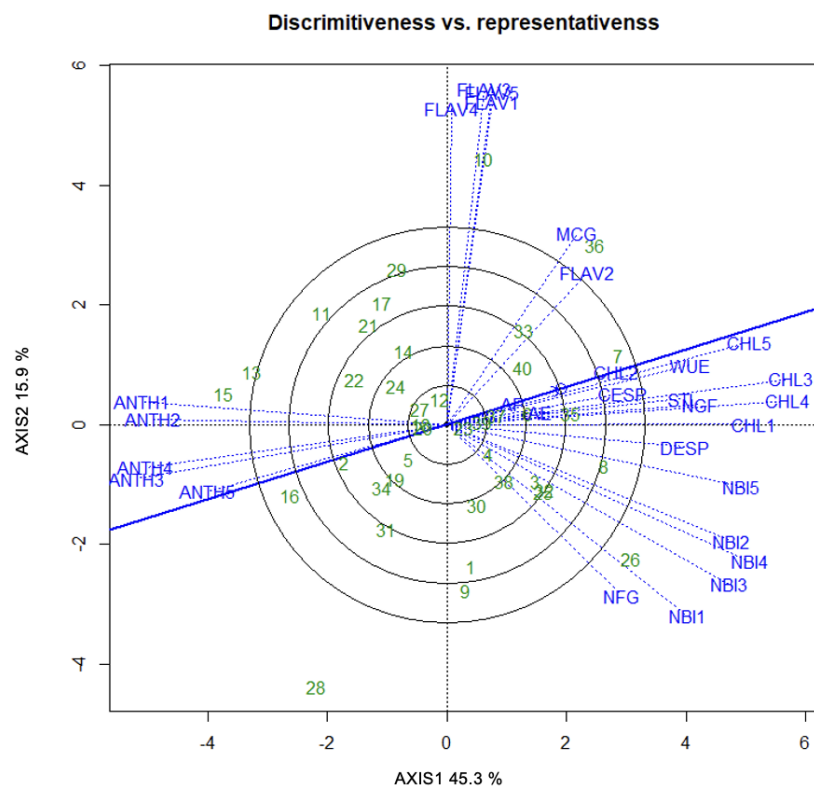
Figura 10. Gráfico *Biplot Means × Stability* da dispersão de características avaliadas em quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas em ambiente (A) sob estresse hídrico (WS) e (B) com plena irrigação (WW). RG - Rendimento de grãos; CE - Capacidade de expansão; NGF - Número de grãos por fileira; NFG - Número de fileira de grãos; MCG - Massa de 100 grãos; DESP - Diâmetro de espiga; CESP - Comprimento de espiga; AE - Altura de espiga; AP - Altura de planta; CHL - Conteúdo foliar de clorofila; FLAV - Conteúdo foliar de flavonoides; ANTH - Conteúdo foliar de antocianina; NBI - Índice do balanço de nitrogênio; WUE - Eficiência agrônoma no uso da água; e STI - Índice de tolerância ao estresse hídrico.

No ambiente com plena irrigação (WW), observou-se que sete genótipos 39 (P7), 35 (P2), 40 (P8), 38 (P6), 25 (L63) e 23 (L59), apresentaram valores acima da média geral para as características avaliadas. Os genótipos 40 (P8), 25 (L63) e 23 (L59) foram considerados aqueles de maior valor de média, bem como aqueles com maior nível de estabilidade (Figura 9B).

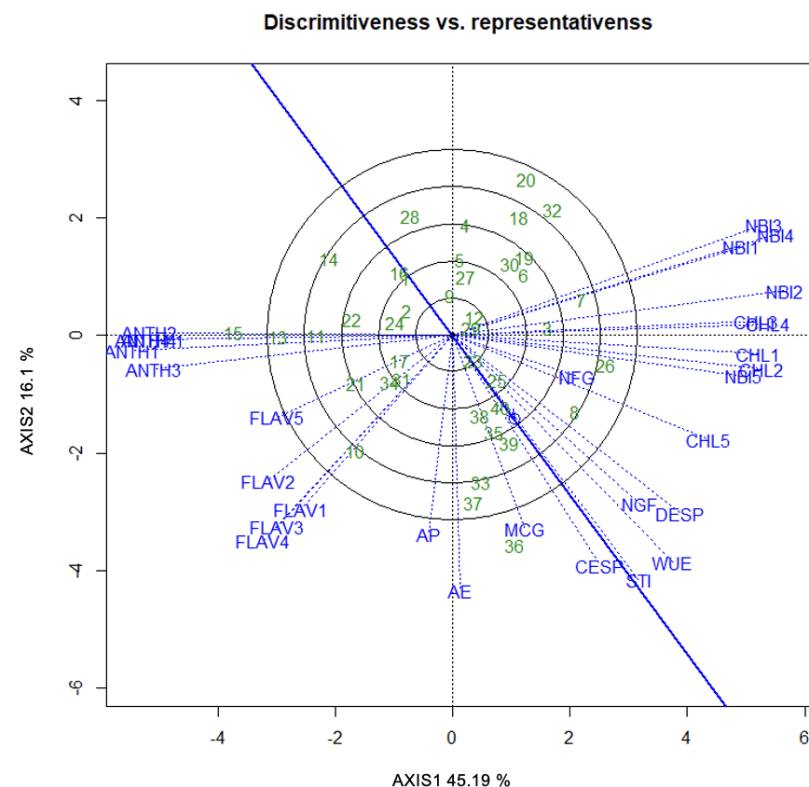
Com base nos ambientes sob déficit hídrico (WS) e irrigação plena (WW) (Figuras 10A e 10B), observa-se que os genótipos 35 (P2), 40 (P8), 38 (P6), 39 (P7) e 23 (L59) destacaram-se por apresentarem alto desempenho médio e boa estabilidade em ambas as condições, conforme indicado pelo Gráfico *Biplot Means × Stability*. Esses materiais demonstram ampla adaptação, sendo promissores tanto para ambientes com restrição hídrica quanto para condições ideais de cultivo, o que os torna candidatos estratégicos para programas de melhoramento voltados à estabilidade e rendimento em múltiplos ambientes.

Já os genótipos 25 (L63) e 10 (L321), embora tenham se destacado sob irrigação plena, apresentaram limitações sob déficit hídrico, o que exige cautela quanto ao seu uso em ambientes com estresse. Por outro lado, genótipos como 26 (L65) e 8 (L292), mesmo com certa estabilidade sob déficit, carecem de desempenho médio satisfatório, indicando a necessidade de avaliações adicionais para melhor averiguar a perspectiva de que possam vir a ser indicados para participação em programas de melhoramento.

A análise do gráfico *Discriminant × Representative* do *Biplot* (Figuras 11A e B) é realizada observando-se a posição dos vetores das variáveis (características) em relação aos genótipos avaliados. Neste gráfico, o objetivo é identificar quais variáveis possuem maior capacidade discriminativa, ou seja, aquelas que contribuem significativamente para a diferenciação entre os genótipos; ao mesmo tempo, quais são mais representativas da média geral dos dados. As variáveis mais úteis para a seleção são aquelas que formam um ângulo pequeno com o eixo médio dos genótipos, indicando alta representatividade, e que possuem também vetores longos, sugerindo alto poder discriminante (Krisnawati e Adie, 2019).



A



B

Figura 11. Gráfico *Biplot Discriminant x Representative* da dispersão de características avaliadas em um painel de quarenta linhagens de milho-pipoca em cultivo sob condição de (A) estresse hídrico (WS) e (B) de irrigação plena (WW). RG - Rendimento de grãos; CE - Capacidade de expansão; NGF - Número de grãos por fileira; NFG - Número de fileira de grãos; MCG - Massa de 100 grãos; DESP - Diâmetro de espiga; CESP - Comprimento de espiga; AE - Altura de espiga; AP - Altura de planta; HL - Conteúdo foliar de clorofila; FLAV - Conteúdo foliar de flavonoides; ANTH - Conteúdo foliar de antocianina; NBI - Índice do balanço de nitrogênio; WUE - Eficiência agrônômica no uso da água; e STI: Índice de tolerância ao estresse hídrico.

No ambiente com déficit hídrico (WS) (Figura 11A), destacaram-se as características CHL2, CESP, NGF, STI, WUE, CHL1, CHL4 e CHL3, evidenciando elevado potencial de discriminação e representatividade. Essas variáveis são fundamentais para a seleção de genótipos adaptados a condições de estresse hídrico, pois refletem atributos morfofisiológicos e produtivos associados à tolerância ao déficit hídrico.

A altura da planta é uma característica morfológica relevante na seleção de genótipos de milho-pipoca adaptados ao déficit hídrico. Plantas com menor estatura tendem a apresentar menor área foliar exposta, o que pode resultar em redução da transpiração e maior eficiência no uso da água (Kamphorst et al., 2018). E estudo com milho comum, Huang et al. (2023) demonstraram que o déficit hídrico afeta significativamente a altura das plantas, sendo uma das características mais impactadas, juntamente com a altura de inserção da espiga e a produtividade de grãos.

A altura de inserção da espiga também é relevante na seleção de genótipos de milho-pipoca para ambientes com déficit hídrico. A inserção mais baixa da altura de espiga está associada a melhor estabilidade da planta, reduzindo o risco de acamamento e facilitando a colheita, especialmente em sistemas mecanizados.

O conteúdo de clorofila nas folhas está diretamente relacionado à capacidade fotossintética das plantas, influenciando a produção de assimilados necessários para o crescimento e desenvolvimento dos grãos (Colpo et al., 2023). Em condições de estresse hídrico, a manutenção de níveis adequados de clorofila indica uma maior tolerância ao estresse, permitindo que a planta continue a realizar a fotossíntese de forma eficiente (Tsai et al., 2019).

O comprimento médio da espiga é uma característica agronômica importante na seleção de genótipos de milho-pipoca para condições de déficit hídrico. Espigas mais longas geralmente indicam um maior número de grãos, refletindo uma melhor fertilização e desenvolvimento durante a fase reprodutiva (Kamphorst et al., 2021a). Sob estresse hídrico, o comprimento da espiga pode ser reduzido devido à menor disponibilidade de assimilados e à desidratação dos tecidos reprodutivos (Santos et al., 2021).

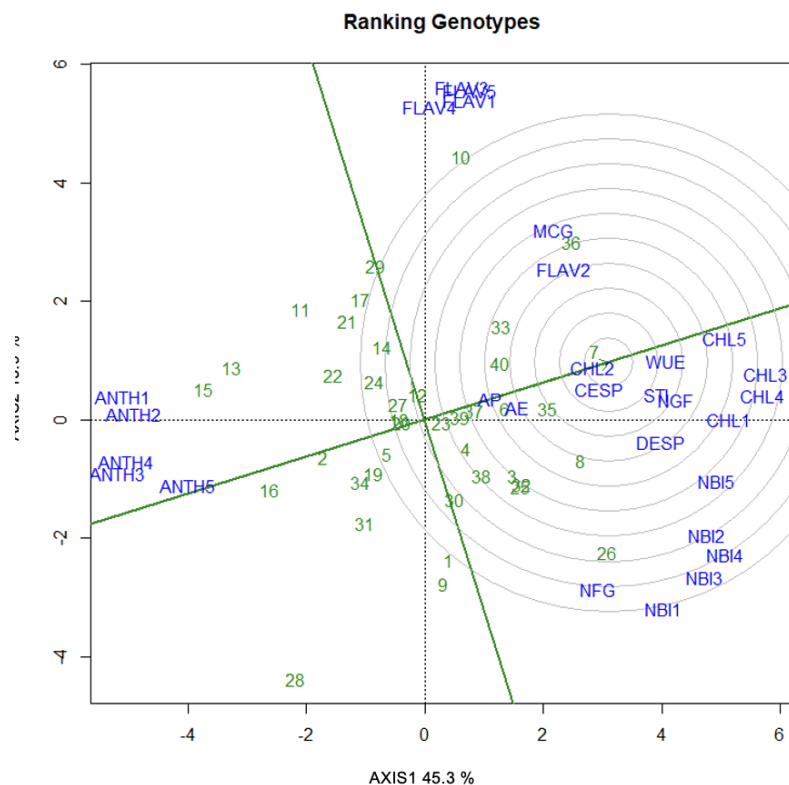
O número de grãos por fileira é uma característica diretamente associada à produtividade do milho-pipoca e é sensível às condições de disponibilidade hídrica durante a fase de florescimento e enchimento de grãos. O estresse hídrico pode

afetar negativamente a polinização e o desenvolvimento dos grãos, resultando em fileiras com menor número de grãos (Lima et al., 2019). Genótipos que conseguem manter um número elevado de grãos por fileira mesmo sob déficit hídrico demonstram maior tolerância ao estresse e são preferidos em programas de melhoramento voltados para regiões com limitações hídricas (Kamphorst et al., 2021).

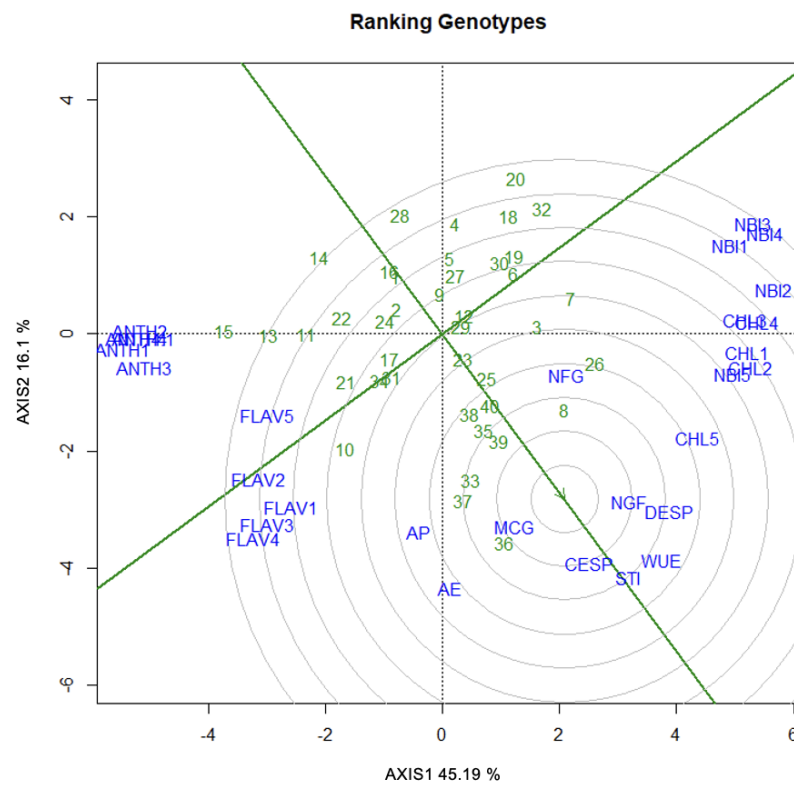
O índice de tolerância ao estresse hídrico (STI) e a eficiência agronômica no uso da água (WUE) são estimadores cruciais para a seleção de genótipos de milho-pipoca adaptados à seca. Enquanto WUE destaca os genótipos mais eficientes no uso da água, STI identifica genótipos produtivos sob estresse (Kamphorst et al., 2022).

A avaliação de variáveis como AP, AE, CHL, CESP, NGF, STI e WUE permite uma percepção mais precisa e eficaz para a identificação de genótipos superiores. Assim, estratégias de melhoramento baseadas nesses estimadores são essenciais para o desenvolvimento de cultivares mais resilientes, produtivas e sustentáveis em regiões sujeitas à escassez hídrica, contribuindo para a segurança alimentar e a estabilidade da produção agrícola.

O gráfico "*Ranking Genotypes*" do *Biplot* (Figuras 12A e 12B) classifica os genótipos com base em sua proximidade ao genótipo ideal, também conhecido como ideótipo. Esse genótipo ideal é um conceito teórico que representa o desempenho máximo desejável, combinando alta produtividade e estabilidade (Méndez-Álvarez et al., 2021). No *Biplot*, ele é representado pelo ponto mais distante na direção positiva do eixo principal (PC1) e com menor projeção no segundo componente (PC2), ou seja, o mais próximo do centro dos círculos concêntricos. Genótipos localizados próximos a esse ponto são considerados superiores, pois apresentam desempenho consistente e elevado em diferentes ambientes.



A



B

Figura 12. Gráfico *Biplot Ranking Genotypes* da dispersão de características avaliadas em um painel de quarenta linhagens de milho-pipoca cultivadas em condição de (A) estresse hídrico (WS) e (B) de irrigação plena (WW). RG - Rendimento de grãos; CE - Capacidade de expansão; NGF - Número de grãos por fileira; NFG - Número de fileira de grãos; MCG - Massa de 100 grãos; DESP - Diâmetro de espiga; CESP - Comprimento de espiga; AE: Altura de espiga; AP - Altura de planta; CHL - Conteúdo foliar de clorofila; FLAV - Conteúdo foliar de flavonoides; ANTH - Conteúdo foliar de antocianina; NBI - Índice do balanço de nitrogênio; WUE - Eficiência agrônômica no uso da água; e STI - Índice de tolerância ao estresse hídrico.

Em conclusão, os genótipos que mais se aproximaram do ideótipo, conforme ilustrado no gráfico "*Ranking Genotypes*" do *Biplot* (Figura 12), foram identificados separadamente para os ambientes com e sem déficit hídrico. No ambiente com déficit hídrico (WS) (Figura 12A), os genótipos que apresentaram maior proximidade ao ideótipo foram aqueles que se destacaram pela combinação de alto rendimento e estabilidade sob estresse hídrico, a saber: 7 (L291), 35 (P2), 6 (L273), 8 (L292), 40 (P8), 33 (L75) e 36 (P3). Já no ambiente sem déficit hídrico (WW) (Figura 11B), os genótipos 36 (P3), 8 (L292), 39 (P7), 35 (P2), 33 (L75), 37 (P4), 38 (P6), 40 (P8), 25 (L63), 26 (L65), 23 (L59), 3 (L217), 29 (L688), 12 (L332) e 7 (L291), mostraram-se mais próximos ao ideótipo, evidenciando desempenho superior em condições ideais de cultivo.

A distinção entre os genótipos mais próximos ao ideótipo em cada condição reforça a importância da avaliação entre ambientes no melhoramento genético do milho-pipoca, especialmente quando se busca aliar produtividade e estabilidade em cenários contrastantes de disponibilidade de água. Esses genótipos destacados constituem, portanto, potenciais candidatos para avanços em programas de melhoramento voltados à adaptação e resiliência frente ao déficit hídrico.

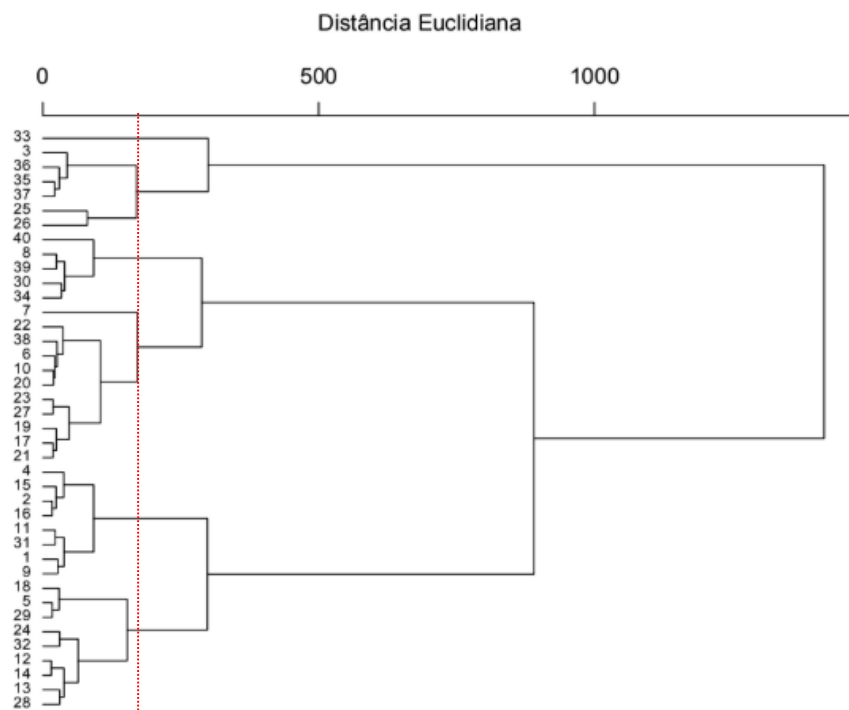
5.8 Análise de diversidade genética

A avaliação da diversidade genética desempenha um papel essencial na identificação de genótipos com alto potencial agrônomo e ampla variabilidade genética, permitindo o agrupamento de indivíduos com base em seus níveis de semelhança ou divergência e auxiliando na seleção de parentais mais adequados para programas de cruzamento (Cruz et al., 2014).

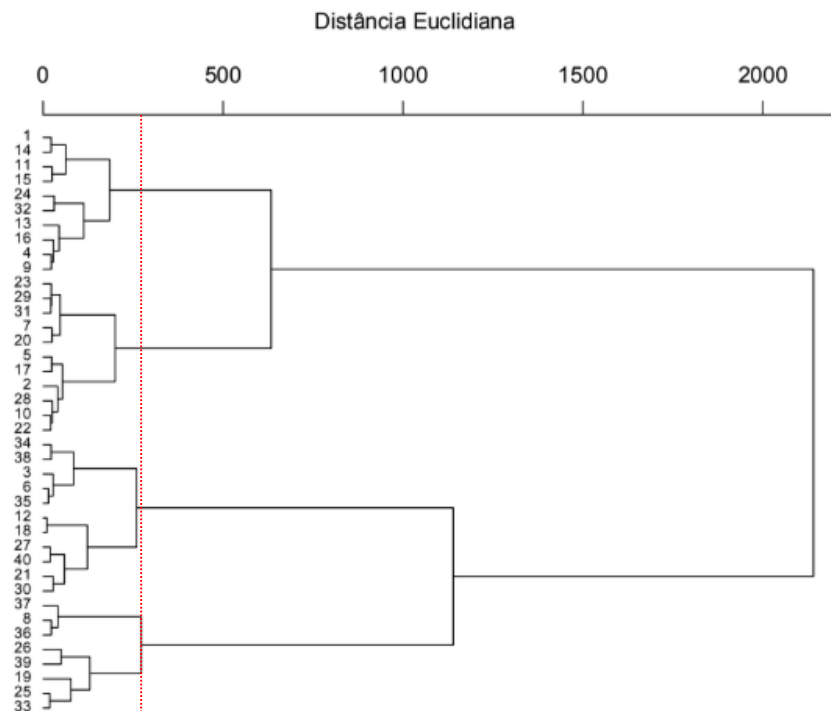
Estudos em diversas culturas demonstram que a avaliação de características agrônomicas com demais avaliações permite detectar ampla variabilidade genética, formar grupos distintos e identificar associações entre traços de interesse, como produtividade, precocidade, resistência a doenças e qualidade nutricional (Tahir et al., 2023).

Desse modo, com base na distância euclidiana média e no agrupamento de Ward, a análise de dissimilaridade genética entre as linhagens de milho-pipoca estudadas nos dois ambientes permitiu a formação de quatro grupos em WW e três grupos em WS (Figuras 12A e B).

No ambiente WS (Figura 13A), o Grupo 1 foi composto pelas linhagens L217, L63, L65, L75, P2, P3 e P4, as quais apresentaram as maiores médias para NGF, NFG, DESP e CESP. O Grupo 2 incluiu L273, L291, L292, L321, L391, L501, L507, L509, L54, L59, L655, L691, L76, P6, P7 e P8, que se destacaram por apresentarem as menores médias para AE, AP e FLAV5. Já o Grupo 3 reuniu as linhagens L203, L204, L220, L263, L294, L324, L332, L358, L381, L382, L386, L472, L61, L684, L688, L693 e L71, caracterizadas por menores médias para NGF e NFG, além de maiores médias para AE.



A



B

Figura 13. Dendrogramas ilustrativos da dispersão genotípica de quarenta linhagens de milho-pipoca pelo método de Ward utilizando a Distância Euclidiana Média. **A:** condição com estresse hídrico (WS); e **B:** condição com irrigação plena (WW).

No ambiente WW (Figura 12B), o Grupo 1 foi formado pelas linhagens L203, L381, L324, L382, L61, L71, L358, L386, L220 e L294, que apresentaram menores médias para NFG, DESP, CESP, CHL1, CHL2, NBI1, NBI3, NBI4 e NBI5, além de maiores médias para ANTH1, ANTH2, ANTH3, ANTH4, AE e AP.

O Grupo 2, composto pelas linhagens L59, L688, L693, L291, L507, L263, L391, L204, L684, L321 e L54, apresentou menores médias para FLAV1. O Grupo 3 incluiu as linhagens L76, P6, L217, L273, P2, L332, L472, L655, P8, L509 e L691, que se destacaram por apresentarem maiores médias para FLAV3, ANTH1 e ANTH5. Por fim, o Grupo 4, constituído pelas linhagens P4, L292, P3, L65, P7, L501, L63 e L75, apresentou menores médias para ANTH1, FLAV2 e NBI5, além de maiores médias para NGF, NFG, DESP, CESP, CHL1, CHL2, CHL3, CHL4, CHL5, NBI2, NBI3 e NBI4.

A análise da diversidade genética em condições contrastantes de disponibilidade hídrica permitiu a formação de grupos distintos de linhagens de milho-pipoca, evidenciando a variabilidade genética existente no conjunto avaliado. No ambiente com déficit hídrico (WS), observou-se a separação de genótipos com melhor desempenho para características relacionadas à produção de grãos e espigas (NGF, NFG, DESP e CESP), enquanto outros grupos foram associados a menores médias para atributos fisiológicos e agrônômicos.

Já no ambiente bem irrigado (WW), a distribuição dos grupos refletiu a variação em atributos relacionados à composição de pigmentos, clorofilas e índices nitrogênio. Esses resultados demonstram o potencial de uso da diversidade genética para direcionar estratégias de melhoramento, especialmente na identificação de linhagens superiores e adaptadas a condições de estresse hídrico.

O Grupo 1, em condição de déficit hídrico (WS), apresentou linhagens promissoras devido aos altos valores observados para os caracteres NGF, NFG, DESP e CESP, os quais estão diretamente relacionados à produtividade da cultura. Esses resultados indicam que as linhagens pertencentes a esse grupo possuem maior potencial produtivo mesmo sob estresse hídrico.

Com base na análise de diversidade genética, recomenda-se cruzar linhagens do grupo 1 de WS (como L65, P3 e L75) — que apresentaram alto desempenho para características produtivas sob estresse hídrico — com linhagens dos Grupos 2 e 3 de WS (como L273, L294, L61 ou L203), que mostraram desempenho inferior nessas mesmas características. Cruzar linhagens com maior divergência genética pode apresentar melhor complementação entre as características desejadas, explorando a complementaridade genética entre genótipos contrastantes.

6. CONCLUSÕES

O estresse hídrico comprometeu de forma significativa o desempenho das linhagens avaliadas, principalmente em características diretamente associadas à produtividade, como RG, CE e MCG. A avaliação fisiológica realizada aos vinte e dois dias após a suspensão da irrigação mostrou-se especialmente estratégica, por coincidir com o período de maior estresse para as plantas, momento em que foram observadas respostas fisiológicas relevantes, como a redução nos teores de flavonoides e o aumento no índice de balanço de nitrogênio, refletindo o acionamento de mecanismos adaptativos frente à limitação hídrica.

Além dos ganhos obtidos com a seleção convencional de características morfoagronômicas, os resultados deste estudo reforçam o potencial da seleção indireta com base em variáveis fisiológicas de fácil mensuração e não destrutivas, como o teor de clorofila e o índice de balanço de nitrogênio. Essas variáveis apresentaram associações positivas com componentes produtivos importantes, como número de fileiras por espiga (NFG), número de grãos por fileira (NGF), diâmetro e comprimento da espiga (DESP e CESP), contribuindo para o incremento indireto do rendimento de grãos.

A análise de diversidade genética permitiu identificar linhagens promissoras para cruzamentos estratégicos. Recomenda-se a implementação de cruzamentos em modelo de dialelo parcial entre as linhagens do grupo 1 (L65, P3 e L75), que apresentaram alto desempenho produtivo, com linhagens dos grupos 2 e 3 (L273,

L294, L61 e L203), que detiveram desempenho inferior, mas ampla variabilidade genética.

Sugere-se, também, a implementação de dialelo completo entre as linhagens L65, L75, L217, P2, P3, P7 e P8, com sustentação nas inferências de eficiência agrônômica no uso da água e da produtividade. Essas abordagens visam explorar o potencial genético decorrente da combinação entre genótipos contrastantes, ampliando as chances de obter híbridos mais vigorosos, adaptados e produtivos em ambientes sujeitos à escassez de água. Por ultimado, os achados do presente estudo oferecem subsídios relevantes para a implementação de programas de melhoramento genético voltados à tolerância ao déficit hídrico, contribuindo para a sustentabilidade e a segurança produtiva da cultura do milho-pipoca em cenários climáticos desafiadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd El-Rady, Ayman G., Koubisy, Y. S. I. (2023) Evaluation of some bread wheat genotypes for grain yield and its components under water stress conditions. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, v. 101, n. 1, p. 110–118. doi:10.21608/ejar.2023.174635.1300.
- Ali, F., Ahsan, M., Ali, Q., Kanwal, N. (2017) Phenotypic Stability of Zea mays Grain Yield and Its Attributing Traits under Drought Stress. *Front Plant Sci* 8: 1–11.
- Amaral Júnior, A.T. do., Gonçalves, L.S.A., Freitas Júnior, S. de P., Candido, L.S., Vittorazzi, C., Pena, G.F., Ribeiro, R.M., Silva, T.R. da C., Pereira, M.G., Scapim, C.A., Viana, A.P., Carvalho, G.F. de. (2013) UENF 14: a new popcorn cultivar. *Crop Breed Appl Biotechnol* 13: 218–220.
- Amjlef, A., Farsad, S., Chaoui, A., Ben Hamou, A., Ezzahery, M., Et-Taleb, S., El Alem, N. (2023) Effective adsorption of Orange G dye using chitosan cross-linked by glutaraldehyde and reinforced with quartz sand. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 239, p. 124373. doi:10.1016/j.ijbiomac.2023.124373.
- Albahri, G.; Alyamani, A. A., Badran, A., Hijazi, A., Nasser, M., Maresca, M., Baydoun, E. (2023) Enhancing Essential Grains Yield for Sustainable Food Security and Bio-Safe Agriculture through Latest Innovative Approaches. *Agronomy*, v. 13, n. 7, p. 1709. doi.org/10.3390/agronomy13071709.

- Almeida, R. N. de., Vivas, M., Souza, Y. P. de., Saluci, J. C. G.; Vasconcelos, L. C., Amaral Júnior, A. T. do. (2024) Proposal of a super trait for increased grain yield, popping expansion, and ear rot resistance in popcorn. *Crop Science*, v. 64, n. 5, p. 2789-2800. doi.org/10.1002/csc2.21308.
- Araus, J.L., Kefauver, S.C., Zaman-Allah, M., Olsen, M.S., Cairns, J.E. (2018) Translating High-Throughput Phenotyping into Genetic Gain. *Trends Plant Sci* 23: 451–466.
- Bigolin, T., & Talamini, E. (2024) Impacts of climate change scenarios on the corn and soybean double-cropping system in Brazil. *Climate*, 12(3), 42. <https://doi.org/10.3390/cli12030042>.
- Bispo, R. B., Amaral Junior, A. T. do., Pinto, V. B., Santos, T. de O., Lima, V. J. de., Simão, B. R., Fischer, A., Naldrett, M. J., Alvarez, S. (2024) *Unraveling the Mechanisms of Efficient Phosphorus Utilization in Popcorn (Zea mays L. var. everta): Insights from Proteomic and Metabolite Analysis*. *Journal of Proteome Research*, v. 23, n. 8, p. 3108-3123. doi:10.1021/acs.jproteome.3c00772.
- Bohnert, H. J.; Jensen, R. G. (1996) Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. *Trends in Biotechnology*, v. 14, n. 3, p. 89–97. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(96\)80929-2](https://doi.org/10.1016/0167-7799(96)80929-2).
- Caranhato, A. L. H., Trindade, R. W. R., Uhdre, R. S., Pinto, R. J. B., Scapim, C. A., & Paterniani, M. E. A. G. Z. (2022) Genetic Improvement in Popcorn. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 21, e1272. doi.org/10.18512/rbms2022v21e1272.
- Carvalho, C. M., Khan, S., Amaral Júnior, A. T., Lima, V. J., Silva, J. G. S., Fuly, L. M. C., Leite, J. T., Santos Júnior, D. R., Viana, F. N., Souza, R., Vieira, H. D., & Kamphorst, S. H. (2023) Early selection for drought tolerance in popcorn based on gene effects estimated in seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1203972. doi.org/10.3389/fpls.2023.1203972.
- Castro-Campos, F. G., Cabrera-Ramírez, Á. H., Morales-Sánchez, E., Méndez-Montealvo, G., Velázquez, G., Rodríguez-García, M. E., Villamiel, M., & Gaytán-Martínez, M. (2021) Impact of the popping process on the structural and thermal

- properties of sorghum grains (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Food Chemistry*, 348, 129092. doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129092.
- Ceylan, M., Karababa, E., & Öner, M. D. (2002) Comparison of sensory properties of popcorn from various types and sizes of kernel. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(2), 127–133. doi.org/10.1002/jsfa.1000.
- Coco Jr., M.G., & Vinson, J.A. (2019) Analysis of Popcorn (*Zea Mays* L. var. *everta*) for Antioxidant Capacity and Total Phenolic Content. *Antioxidants*, 8(1), 22. doi.org/10.3390/antiox8010022.
- Colpo, A., Demaria, S., Baldisserotto, C., Pancaldi, S., Brestič, M., Živčák, M., & Ferroni, L. (2023) Long-Term Alleviation of the Functional Phenotype in Chlorophyll-Deficient Wheat and Impact on Productivity: A Semi-Field Phenotyping Experiment. *Plants*, 12(4), 822. https://doi.org/10.3390/plants12040822.
- Cheim, L. M. G., Costa, F. M., Silva, N. C. A., Canepelle, C., Cesar, A. L. T. M. S., Rossignoli, P. A., Faria, A. M. M. (2021) Caracterização de sementes de uma variedade crioula de milho-pipoca (*Zea mays* L. subsp. *mays*) cultivada em sistema orgânico pela Agricultura Familiar. [plataforma ResearchGate]. doi.org/10.33448/rsd-v10i8.1714.
- Cruz, C. D. (2013) Genes: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 35, n. 3, p. 271–276. DOI: https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251.
- Cruz, C. D., Carneiro, P. C. S., Regazzi, A. J. (2014) Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético: volume 2. 3. ed. Viçosa: Editora UFV. 668 p. ISBN: 978-85-7269-515-2.
- Engels, J.M.M. Ebert, A.W. Thormoann, I. Vicente M.C. (2006) Centre of crop diversity and/or origin, genetically modified crops and implications for plant genetic resources conservation. *Genetic Resources and Crop Evolutions*, 53:1675-1688.
- do Amaral Júnior, A.T., dos Santos, A., Gerhardt, I.F.S., Kurosawa, R.N.F., Moreira, N.F., Pereira, M.G., de A. Gravina, G., de L. Silva, F.H. (2016) Proposal of a super trait for the optimum selection of popcorn progenies based on path analysis. *Genet Mol Res* 15: 1–9.

- Ellis, A. D., Gross, A. R., Budd, J. R., Miller, W.G. (2020) Influence of Reagent Lots and Multiple Measuring Systems on Estimating the Coefficient of Variation from Quality Control Data; Implications for Uncertainty Estimation and Interpretation of QC Results. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 58(11), 1829–1835. doi.org/10.1515/cclm-2020-0320.
- Embrapa. (2025) Milho-pipoca – Sistemas diferenciais de cultivo. Agência de Informação Tecnológica (Ageitec). Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo/milho-pipoca>.
- Ferreira, A., & Figueiredo, M. A. T. (2012). Efficient feature selection filters for high-dimensional data. *Pattern Recognition Letters*, 33(13), 1794–1804. doi.org/10.1016/j.patrec.2012.05.019
- Freitas Júnior, S.P., Amaral Júnior, A.T., Rangel, R.M., Viana, A.P. (2009) Predição de ganhos genéticos na população de milho-pipoca UNB- 2U sob seleção recorrente utilizando-se diferentes índices de seleção. *Semina* 4: 803–814.
- Gabriel, K. R. (1971) The Biplot Graphic Display of Matrices with Application to Principal Component Analysis. *Biometrika*, 58, 453-467. <http://dx.doi.org/10.1093/biomet/58.3.453>.
- Galinat, W.C. (1979) Ciba-Geigy Agrochemicals. Maize. Basle, Switzerland: Ciba-Geigy Agrochemicals. 105p.
- Gopinath, I., Hossain, F., Thambiyannan, S., Sharma, N., Duo, H., Kasana, R. K., Katral, A., Devlash, R., Veluchamy, S. S. K. R., Zunjare, R. K., Sekhar, J. C., Guleria, S. K., Rajasekaran, R., & Muthusamy, V. (2024) Unraveling popping quality through insights on kernel physical, agro-morphological, and quality traits of diverse popcorn (*Zea mays* var. *everta*) inbreds from indigenous and exotic germplasm. *Food Research International*, 191, 114676. doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114676.
- Goulart Knebel, E. L., Carvalho, I. R., Vieira Loro, M., Demari, G. H., Soares Ourique, R., Dalla Roza, J. P. (2021) Strategic positioning of soybean cultivars in the state of Rio Grande do Sul. *Scientia Agraria Paranaensis*, p. 378–388. DOI:

10.18188/sap.v20i4.29136.

[https://e-](https://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/29136)

[revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/29136.](https://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/29136)

- Gouveia, B. T., Chandra, A., Kenworthy, K. E., Raymer, Paul L., Schwartz, B., Wu, Y.; Milla-Lewis, S. Rita. (2024) Warm-season turfgrass species genotype-by-environment interaction for turfgrass quality under drought. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 210, n. 1, p. 20-31. doi:10.1111/jac.12681.
- Hamabwe, S. M., Otieno, N. A., Odhiambo, J. A., Parker, T., Kamfwa, K. (2024) Agronomic and morpho-physiological response of Andean genotypes of common bean to terminal drought. *Crop Science*, v. 64, n. 6, p. 3521–3532. doi.org/10.1002/csc2.21362.
- Hauggaard-Nielsen, H., Andersen, M. K., Jørnsgaard, B., Jensen, E. S. (2006) Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea–barley intercrops. *Field Crops Research*, v. 95, n. 2–3, p. 256–267. doi.org/10.1016/j.fcr.2005.03.003.
- Hallauer, A.R., Carena, M.J., Miranda Filho, J.B. (2010) Quantitative Genetics in Maize Breeding. 3. ed. Springer, <http://doi.org/10.1007/978-1-4419-0766-0>.
- Huang, C., Qin, A., Gao, Y., Ma, S., Liu, Z., Zhao, B., Ning, D., Zhang, K., Gong, W., Sun, M., & Liu, Z. (2023) Effects of water deficit at different stages on growth and ear quality of waxy maize. *Frontiers in Plant Science*, 14:1069551. doi: 10.3389/fpls.2023.1069551.
- Hussain, H.A., Men, S., Hussain, S., Chen, Y., Ali, S., Zhang, S., Zhang, K., Li, Y., Xu, Q., Liao, C., Wang, L. (2019) Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. *Sci Rep* 9: 3890.
- Kamara, A.Y., Menkir, A., Badu-Apraku, B., Ibikunle, O. (2003) The influence of drought stress on growth, yield and yield components of selected maize genotypes. *J Agric Sci*, 141: 43–50.
- Kamphorst, S.H., Lima, V.J. De., Leite, J.T., Carvalho, C.M., Xavier, K.B., Campostrini, E. (2018) Popcorn breeding for water-stress tolerance or for agronomic water-use efficiency ?. *Genetics and Molecular Research* 17: 1–18. doi:10.4238/gmr18184

- Kamphorst, S. H., Amaral Júnior, A. T. d., Lima, V. J. d., Guimarães, L. J. M., Schmitt, K. F. M., Leite, J. T., Santos, P. H. A. D., Chaves, M. M., Mafra, G. S., Santos Junior, D. R. d., Cruz, C. D., & Campostrini, E. (2019). Can Genetic Progress for Drought Tolerance in Popcorn Be Achieved by Indirect Selection? *Agronomy*, 9(12), 792. doi.org/10.3390/agronomy9120792.
- Kamphorst, S.H., do Amaral Júnior, A.T., de Lima, V.J., Santos, P. H. A. D., Rodrigues, W. P., Vivas, J. M. S., Gonçalves, G. M. B., Schmitt, K. F. M., Leite, J. T., Vivas, M., Mora-Poblete, F., Vergara-Díaz, O., Araus Ortega, J. L., Ramalho, J. C., Campostrini, E. (2020) Comparison of Selection Traits for Effective Popcorn (*Zea mays* L. var. *everta*) Breeding Under Water Limiting Conditions. *Frontiers in Plant Science*. 11, 1289. doi.org/10.3389/fpls.2020.01289.
- Kamphorst, S. H., do Amaral Junior, A. T., de Lima, V. J., Carena, M. J., Azeredo, V. C., Mafra, G. S., Santos, P. H. A. D., Leite, J. T., Schmitt, K. F. M., dos Santos Junior, D. R., Bispo, R. B., Santos, T. D. O., Oliveira, U. A. D., Pereira, J. L., Lamêgo, D. L., Carvalho, C. M., Gomes, L. P., Silva, J. G. D. S., & Campostrini, E. (2021a). Driving Sustainable Popcorn Breeding for Drought Tolerance in Brazil. *Frontiers in Plant Science*, 12, 732285. doi.org/10.3389/fpls.2021.732285.
- Kamphorst, S.H., Gonçalves, G.M.B., Amaral Júnior, A.T. do., Lima, V.J. de., Schmitt, K.F.M., Leite, J.T., Azeredo, V.C., Gomes, L.P., Silva, J.G. de S., Carvalho, C.M., Mafra, G.S., Daher, R.F., Campostrini, E. (2021b) Supporting Physiological Trait for Indirect Selection for Grain Yield in Drought-Stressed Popcorn. *Plants* 10: 1510.
- Kumar, G. P., Sunil, N., Sekhar, J. C., Chary, D. Srinivasa. (2024) Character Association and Path Coefficient Analysis to Determine Interrelationships among Grain Yield and its Components in Maize Genotypes (*Zea mays* L.). *Journal of Scientific Research and Reports*, v. 30, n. 3, p. 275-283. doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i31878.
- Kurosawa, R. N. F., Vivas, M., Amaral Júnior, A. T., Ribeiro, R. M., Miranda, S. B., Pena, G. F., Leite, J. T., & Mora, F. (2018). Popcorn germplasm resistance to fungal diseases caused by *Exserohilum turcicum* and *Bipolaris maydis*. *Bragantia*, 77(1), 36-47. doi.org/10.1590/1678-4499.2017035.

- Kuswantoro, H., Adie, M. M., Putri, P. H. (2021) Genetic variability, heritability, and genotypic correlation of soybean agronomic characters. *Buletin Palawija*, v. 19, n. 2, p. 117–125. doi:10.21082/bulpa.v19n2.2021.p117-125.
- Krisnawati, A., Adie, M. M. (2019) Yield stability of soybean genotypes in tropical environments based on genotype and genotype-by-environment biplot. *Journal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, v. 46, n. 3, p. 231–239. doi:10.24831/jai.v46i3.18333.
- Lamêgo, D. L., Amaral Junior, A. T. do., Kamphorst, S. H., Lima, V. J. de., Silva, S. P. da., Figueiredo, J. da S., Oliveira, U. A. de., Viana, F. N., Santos, T. de O., Gonçalves, G. R., Souza, G. A. R. de., Campostrini, E., Viana, A. P., Freitas, M. S. M., Ramos, H. C. C., Souza Filho, G. A., Rezende, C. E. de. (2024) Gene effect of morphophysiological traits in popcorn (*Zea mays* L. var. *everta*) grown under contrasting water regimes. *Agriculture*, Basel, v. 14, n. 12, p. 2157. doi.org/10.3390/agriculture14122157.
- Leite, J. T., Amaral Junior, A. T. d., Kamphorst, S. H., Lima, V. J. d., Santos Junior, D. R. d., Schmitt, K. F. M., Souza, Y. P. d., Santos, T. d. O., Bispo, R. B., Mafra, G. S., Campostrini, E., & Rodrigues, W. P. (2021) Water Use Efficiency in Popcorn (*Zea mays* L. var. *everta*): Which Physiological Traits Would Be Useful for Breeding? *Plants*, v. 10, n. 7, p. 1450. doi.org/10.3390/plants10071450.
- Leite, J. T., Amaral Junior, A. T. do., Kamphorst, S. H., Lima, V. J. de, Santos Junior, D. R. dos, Alves, U. O., et al. (2022) All Are in a Drought, but Some Stand Out: Multivariate Analysis in the Selection of Agronomic Efficient Popcorn Genotypes. *Plants* 11, 2275. doi:10.3390/plants11172275.
- Lima, V. J. D., Amaral, A. T. D., Kamphorst, S. H., Santos, A. D., Schmidt, K. F. M., Azeredo, V. C., ... & Santos, P. H. A. D. (2021). UENF WS01: popcorn hybrid with water use efficiency for the state of Rio de Janeiro. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 21(4), e375821411.
- Lima, V. J. Amaral Junior, A. T. do, Kamphorst, S. H., Bispo, R. B., Santos, T. D. O., Carvalho, C. M., Oliveira, U. A. D., Viana, F. N., Campostrini, E.; Santos, M. D., Guimarães, L. J. M., Vivas, M. (2026) Genetic effects of physiological and morphagronomic traists in popcorn under water stress. (no prelo).

- Li, C., Sun, B., Li, Y., Liu, C., Wu, X., Zhang, D., Shi, Y., Song, Y., Buckler, E. S., Zhang, Z., Wang, T., Li, Y. (2016). Numerous genetic loci identified for drought tolerance in the maize nested association mapping populations. *BMC Genomics*, 17(894):2-11
- Ma, Y., Ren, J., Yang, S., Ding, R., Du, T., Kang, S., Tong, L. (2025) Enhancing maize yield and water productivity through coordinated root-shoot growth under mild water stress in dense planting. *Field Crops Research*, v. 323, p. 109786. doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109786.
- Mafra, G. S., de Almeida Filho, J. E., do Amaral Junior, A. T., Maldonado, C., Kamphorst, S. H., de Lima, V. J., et al. (2021). Regional Heritability Mapping of Quantitative Trait Loci Controlling Traits Related to Growth and Productivity in Popcorn (*Zea mays* L.). *Plants* 10, 1845. doi:10.3390/plants10091845.
- Mangesdorf, P.C., Mc Neish, R.S., Galinat, W.C. (1964) Domestication of corn. *Science*, 143: 538-545.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (Brasil). Registro Nacional de Cultivares (RNC): informações sobre cultivares registradas no RNC. Disponível em: https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php.
- Méndez-Álvarez, D., Murillo-Gamboa, O., Badilla-Valverde, Y., Hernández-Castro, W. (2021) Genetic tolerance to Ceratocystis wilt in melina (*Gmelina arborea* Roxb.). *Silvae Genetica*, v. 70, n. 1, p. 195–204. doi:10.2478/sg-2021-0017.
- Muralikrishna, G., Malleshi, N. G., Desikachar, H. S. R., & Tharanathan, R. N. (1986). Effect of Popping on the Properties of Some Millet Starches. *Starch - Stärke*, 38(2), 48–51. doi.org/10.1002/star.19860380204.
- Nardino, M., Silva, F.F.E., Olivoto, T., Barros, W.S., de Carvalho, C.G., Signorini, V.S., Mezzomo, H.C. (2023) Meta-analysis of the experimental coefficient of variation in wheat using the Bayesian and Frequentist approaches. *Scientia Agricola*. 80, e20210190. doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0190.
- Negi, S., Perrine, Z., Friedland, N., Kumar, A., Tokutsu, R., Minagawa, J., Berg, H., Barry, A. N., Govindjee, G., Sayre, R. (2020) Light regulation of light-harvesting antenna size substantially enhances photosynthetic efficiency and biomass yield in green algae. *The Plant Journal*, v. 103, n. 2, p. 584-603. doi.org/10.1111/tpj.14751.

- Ngompe Deffo, T., Kouam, E. B., Mandou, M. S., Bara, R. A., Chotangui, A. H., Souleymanou, A., Beyegue Djonko, H., Tankou, C. M. (2024) Identifying critical growth stage and resilient genotypes in cowpea under drought stress contributes to enhancing crop tolerance for improvement and adaptation in Cameroon. *PLoS ONE*, v. 19, n. 6, e0304674. doi.org/10.1371/journal.pone.0304674.
- Nguyen, L. V., Aracena, G. E., Le, L. T., Rumanzi, M. S., & Nguyen, V. L. (2024) Variation in the Growth and Popping Indicators of Argentina-derived Popcorns in Vietnam. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 22(3), 285–294. doi.org/10.3329/jbau.v22i3.76400.
- Oliveira, U. A. de., Amaral Junior, A. T. do., Leite, J. Torres., Kamphorst, S. H., de Lima, V. J., Bispo, R. B., Ribeiro, R. M., Viana, F. N., Lamego, D. L., Carvalho, C. M., Simão, B. R., de Oliveira Santos, T., Gonçalves, G. R., & Campostrini, E. (2024) Unveiling Drought-Resilient Latin American Popcorn Lines through Agronomic and Physiological Evaluation. *Life*, v. 14, n. 6, p. 743. doi.org/10.3390/life14060743.
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., Tran, L. P. (2014) Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, v. 5, p. 86. doi.org/10.3389/fpls.2014.00086.
- Paes, M.C.D. (2006) Circular Técnica 75: Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG.
- Paterniani, E., Campos, M.S. (2005) Melhoramento do milho. In: Borém, A. (Ed.). Melhoramento de espécies cultivadas. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, p. 491-552.
- Parker, M. L., Grant, A., Rigby, N. M., Belton, P. S., & Taylor, J. R. N. (1999) Effect of popping on the endosperm cell walls of sorghum and maize. *Journal of Cereal Science*, 30(3), 209–216. doi.org/10.1006/jcrs.1999.0281.
- Rogers, A. R., Dunne J. C., Romay, C., Bohn, M., Buckler, E. S., Ciampitti, I. A., Edwards, J., Ertl, D., Flint-Garcia, S., Gore, M. A., Graham, C., Hirsch, C. N., Hood, E., Hooker, D. C., Knoll, J., Lee, E. C., Lorenz, A., Lynch, J. P., McKay, J., Moose, S. P., Murray, S. C., Nelson, R., Rocheford, T., Schnable, J. C., Schnable, P. S., Sekhon, R., Singh, M., Smith, M., Springer, N., Thelen, K., Thomison, P., Thompson, A., Tuinstra, M., Wallace, J., Wissner, R.J., Xu, W., Gilmour, A. R., Kaeppler, S. M.,

- De Leon, N., Holland, J. B. (2021) The importance of dominance and genotype-by-environment interactions on grain yield variation in a large-scale public cooperative maize experiment. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, v. 11, n. 2, p. jkaa050, fev. doi:10.1093/g3journal/jkaa050.
- Romero, A. P., Alarcón, A., Valbuena, R. I.; (2017) Galeano, Carlos H. Physiological Assessment of Water Stress in Potato Using Spectral Information. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, p. 1608. doi.org/10.3389/fpls.2017.01608.
- Royo, C., Dreisigacker, S., Soriano, J. M., Lopes, M. S., Ammar, K., Villegas, D. (2020) Allelic Variation at the Vernalization Response (Vrn-1) and Photoperiod Sensitivity (Ppd-1) Genes and Their Association With the Development of Durum Wheat Landraces and Modern Cultivars. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, p. 838. doi:10.3389/fpls.2020.00838.
- R CORE TEAM (2025) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.
- Santos Junior, D. R., Ribeiro, R. M., do Amaral Junior, A. T., Vivas, M., Saluce, J. C. G., Leite, J. T., Bispo, R. B., de Lima, V. J., Lamego, D. L., Xavier, K. B., Schmitt, K. F. M., Kamphorst, S. H., Viana, F. N., Viana, A. P., & Pereira, M. G. (2022) Allelic Complementation in Hybrid Superiority of Popcorn to Multiple Foliar Diseases. *Agronomy* 12, 3103. doi:10.3390/agronomy12123103.
- Santos Junior, D. R., Amaral Junior, A. T., Lima, V. J., Leite, J. T., Bispo, R. B., Azeredo, V. C., Almeida Filho, J. E., Kamphorst, S. H., Viana, F. N., Ribeiro, R. M., Viana, A. P., & Gravina, G. A. (2023) Recurrent interpopulation selection in popcorn: From heterosis to genetic gains. *Plants*, 12(5), 1056. doi.org/10.3390/plants12051056.
- Santos, T. de O., Amaral Junior, A. T. do, Bispo, R. B., Lima, V. J. de, Kamphorst, S. H., Leite, J. T., Santos Júnior, D. R. d., Santos, P. H. A. D., Oliveira, U. A. d., Schmitt, K. F. M., Campostrini, E., Moulin, M. M., Viana, A. P., Gravina, G. d. A., Corrêa, C. C. G., & Gonçalves, G. M. B. (2021) Phenotyping Latin American Open-Pollinated Varieties of Popcorn for Environments with Low Water Availability. *Plants* 10, 1211. doi:10.3390/plants10061211.

- Sanchez, D., Sadoun, S. B., Mary-Huard, T., Allier, A., Moreau, L., Charcosset, A. (2023) Improving the use of plant genetic resources to sustain breeding programs' efficiency. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 120, n. 14, e2205780119. doi:10.1073/pnas.2205780119.
- Salari, S., Karandish, F., Haghighatjou, P., & Aldaya, M. M. (2023) Hydro-environmental sustainability of crop production under socioeconomic drought. *Water*, 15(2), 288. doi.org/10.3390/w15020288.
- Sawazaki, E. (2001) A cultura do milho pipoca no Brasil. *O Agrônomo*, 53:11-13.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2019) Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 169-183. doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.018.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021) Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants*, 10(2), 259. doi.org/10.3390/plants10020259.
- Silva, W.J., Vidal, B.C., Martins, M.E.Q., Vargas, H., Pereira, A.C., Zerbetto, M.; Miranda, L.C.M. (1993) What makes popcorn pop. *Nature*, 362:417.
- Silva, J. N., Oliveira, A. B., Souza, C. R., Lima, M. G. (2019) Genotypic correlation coefficients and path analysis in cowpea under drought stress. *Crop Science*, v. 59, n. 3, p. 1-10. doi.org/10.2135/cropsci2019.02.0101.​;contentReference[oaicite:1]{index=1}.
- Suresh, P. L., Raju, K. N. (2022) Study of Test for Significance of Pearson's Correlation Coefficient. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, v. 11, n. 10, p. 164-166. doi:10.21275/SR22915140002.
- Schwantes, I.A., do Amaral Júnior, A.T., Vivas, M., de Almeida Filho, J.E., Kamphorst, S.H., Guimarães, A.G., Khan, S. (2018) Inheritance of resistance to *Fusarium* ear rot in popcorn. *Crop Breed Appl Biotechnol*. 18: 81-88.

- Shomali, A., Aliniaiefard, S., Mohammadian, M., Lotfi, M., Kalaji, H. M. (2023) Genotype-dependent Strategies to “Overcome” Excessive Light: Insights into Non-Photochemical Quenching under High Light Intensity. *Physiologia Plantarum*. doi.org/10.1111/ppl.14077.
- Schmidt, P., Hartung, J., Bennewitz, J., Piepho, H. (2019) Heritability in Plant Breeding on a Genotype-Difference Basis. *Genetics*, v. 212, n. 4, p. 991–1008. DOI: 10.1534/genetics.119.302134.
https://academic.oup.com/genetics/article/212/4/991/5931331?utm_source=chatgpt.com&login=false.
- Schmitt, K. F. M., Amaral Júnior, A. T. do, Kamphorst, S. H., Pinto, V. B., Lima, V. J. de, Oliveira, U. A. de, Viana, F. N., Leite, J. T., Gomes, L. P., Silva, J. G. de S., Lamêgo, D. L., Bernado, W. de P., Souza, G. A. R. de, Almeida, F. A. de, Souza Filho, G. A. de, Silveira, V., & Campostrini, E. (2024) Decoding the effects of drought stress on popcorn (*Zea mays* var. *everta*) flowering combining proteomics and physiological analysis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 208, 108444. doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108444.
- Sharma, D. K., Andersen, S. Bode., Ottosen, C., Rosenqvist, E. (2015) Wheat cultivars selected for high Fv/Fm under heat stress maintain high photosynthesis, total chlorophyll, stomatal conductance, transpiration and dry matter. *Physiologia Plantarum*, v. 153, n. 2, p. 284-298. doi.org/10.1111/ppl.12245.
- Stansluos, A. A. L., Öztürk, A., Niedbała, G., Türkoğlu, A., Haliloğlu, K., Szulc, P., Omrani, A., Wojciechowski, T., Piekutowska, M. (2023) Genotype–Trait (GT) Biplot Analysis for Yield and Quality Stability in Some Sweet Corn (*Zea mays* L. *saccharata* Sturt.) Genotypes. *Agronomy*, v. 13, n. 6, p. 1538. doi:10.3390/agronomy13061538.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., Murphy, A. (2024) Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed Editora.
- Tsai, Y. C., Chen, K. C., Cheng, T.-S., Lee, C.; Lin, S.-H., Tung, C.-W. (2019) Chlorophyll fluorescence analysis in diverse rice varieties reveals the positive correlation between the seedlings salt tolerance and photosynthetic efficiency. *BMC Plant Biology*, v. 19, n. 403. doi:10.1186/s12870-019-1983-8.

- Tahir, O., Bangash, S. A. K., Ibrahim, M., Shahab, S., Khattak, S. H., Ud Din, I., Khan, M. N., Hafeez, A., Wahab, S., Ali, B., Makki, R. M., & Harakeh, S. (2023) Evaluation of agronomic performance and genetic diversity analysis using simple sequence repeats markers in selected wheat lines. *Sustainability*, 15(1), 293. doi.org/10.3390/su15010293.
- Ullah, I., Khalil, I. H., Salman, S., Mehmood, N., Majid, A.; Shah, S. N. M.; Ahmed, Z. (2024) Selection under stress: Assessing wheat genotypes for drought stress resilience. *Sarhad Journal of Agriculture*, v. 40, n. 3, p. 680–691. doi.org/10.17582/journal.sja/2024/40.3.680.691.
- Viana, F. N., Chaves, M. M., Kamphorst, S. H., do Amaral Junior, A. T., Lima, V. J. de, Leite, J. T., Schmidt, K. F. M., Oliveira, U. A. d., Lamego, D. L., Pereira, J. L., Pena, G. F., Vieira, H. D., Oliveira, J. G. d., Daher, R. F., Campostrini, E., & Bressan-Smith, R. (2022) Heritability of Morphophysiological Traits in Popcorn for Drought Tolerance and Their Use as Breeding Indicators of Superior Genotypes. *Agronomy* 12, 1517. doi:10.3390/agronomy12071517.
- Vukadinović, J.; Srdić, J.; Kravić, N.; Mladenović Drinić, S.; Simić, M.; Brankov, M., & Dragičević, V. (2024) Assessment of Popcorn's Bioactive Status in Response to Popping. *Molecules*, 29(4), 807. doi.org/10.3390/molecules29040807.
- Walsh, B; Lynch, M. (2018) Short-term Changes in the Variance: 2. Changes in the Environmental Variance. In: WALSH, Bruce; LYNCH, Michael. *Evolution and Selection of Quantitative Traits*. Oxford University Press. <https://academic.oup.com/book/40062/chapter-abstract/340634175?redirectedFrom=fulltext&login=false>.
- Wang, B., Liu, C., Zhang, D., He, C., Zhang, J., Li, Z. (2019) Effects of maize organ-specific drought stress response on yields from transcriptome analysis. *BMC Plant Biol* 19: 335.
- Wang, Z.; Xiao, X.; Rajasekaran, S. (2020) Novel and efficient randomized algorithms for feature selection. *Big Data Mining and Analytics*, v. 3, n. 3, p. 208–224. doi:10.26599/BDMA.2020.9020005.

- Wheeler, H. E., Shah, K. P., Brenner, J., Garcia, T., Aquino-Michaels, K., GTEx C., Cox, N. J., Nicolae, D. L., Im, H. K. (2016) Survey of the Heritability and Sparse Architecture of Gene Expression Traits across Human Tissues. *PLoS Genetics*, [S.l.], v. 12, n. 11, p. e1006423. doi.org/10.1371/journal.pgen.1006423.
- Whitlock, M. C., Fowler, K. (1999) The changes in genetic and environmental variance with inbreeding in *Drosophila melanogaster*. *Genetics*, v. 152, n. 1, p. 345–353. doi:10.1093/genetics/152.1.345.
- Yan, W., Kang, M. S. (2003) GGE biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists and agronomists. Flórida: Boca Raton. 286p.
- Yan, W., Frégeau-Reid, J. (2018) Genotype by Yield*Trait (GYT) Biplot: a Novel Approach for Genotype Selection based on Multiple Traits. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 8242. doi:10.1038/s41598-018-26688-8.
- Yan, W. (2014) Crop Variety Trials: Data Management and Analysis.
- Yu, Lei., Liu, Huan. (2004) Efficient feature selection via analysis of relevance and redundancy. *Journal of Machine Learning Research*, v. 5, p. 1205–1224. <https://www.jmlr.org/papers/volume5/yu04a/yu04a.pdf>.
- Zermeño-Campos, L. F., Santacruz-Varela, A., López-Sánchez, H., Calderón-Sánchez, F., García-Perea, H., & Pizeno-García, J. L. (2024) Efficiency of Stratification on Yield and Popping Expansion of Popcorn in the Context of Mass Selection. *Agronomy*, 14(11), 2568. doi.org/10.3390/agronomy14112568.
- Zia, S., Romano, G., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., Araus, J.L., Müller, J. (2013) Infrared Thermal Imaging as a Rapid Tool for Identifying Water-Stress Tolerant Maize Genotypes of Different Phenology. *J Agron Crop Sci* 199: 75– 84.
- Zinsly, J.R., Machado, J.A. (1980) *Melhoramento e produção do milho no Brasil: Botânica. Piracicaba/ESLQ, Marprint.*
- Zhang, L., Fu, M., Li, W., Dong, Y., Zhou, Q., Wang, Q., Li, X., Gao, J., Wang, Y., Wang, H., Li, Y., Wang, J., Wu, Y., & Li, Y. (2024). Genetic variation in ZmKW1 contributes to kernel weight and size in dent corn and popcorn. *Plant Biotechnology Journal*, 22(6), 1453-1467. doi.org/10.1111/pbi.14279.