UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA TROPICAL – PPGZT

MARCOS DA SILVA CARNEIRO

ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS TROPICAIS

Bom Jesus – PI
2026

MARCOS DA SILVA CARNEIRO

ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS TROPICAIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical (PPGZT) da Universidade Federal do Piauí (UFPI), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Produção Animal nos Trópicos. Linha de pesquisa: Produção de Alimentos e Nutrição Animal nos Trópicos.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Fonseca Da Silva

Bom Jesus - PI
2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas Setor
de Processamento Técnico

C289e Carneiro, Marcos da Silva.
Estratégias para mitigação do estresse hídrico em gramíneas forrageiras tropicais / Marcos da Silva Carneiro. -- 2026.
68 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical, Bom Jesus, Piauí, 2026.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel".
"Coorientação: Prof. Dr. Rodrigo Fonseca da Silva".

1. Zootecnia. 2. Aditivos agrícolas. 3. Resiliência vegetal. I. Gurgel, Antonio Leandro Chaves. II. Silva, Rodrigo Fonseca da. III. Título.

CDD 636

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

MARCOS DA SILVA CARNEIRO

ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS TROPICAIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical (PPGZT) da Universidade Federal do Piauí (UFPI), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Produção Animal nos Trópicos. Linha de pesquisa: Produção de Alimentos e Nutrição Animal nos Trópicos.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Fonseca da Silva

Aprovado em: 03 de Julho de 2026.

BANCA EXAMINADORA

gov.br
Documento assinado digitalmente
ANTONIO LEANDRO CHAVES GURGEL
Data: 13/08/2026 07:52:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel (PPGZT/UFPI)
Orientador

gov.br
Documento assinado digitalmente
RODRIGO FONSECA DA SILVA
Data: 11/08/2026 14:47:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Rodrigo Fonseca da Silva (UFPI)
Coorientador

gov.br
Documento assinado digitalmente
MARCOS JACOME DE ARAUJO
Data: 04/08/2026 15:02:47-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Marcos Jácome de Araújo (PPGZT/UFPI)
Avaliador interno

gov.br
Documento assinado digitalmente
GELSON DOS SANTOS DIFANTE
Data: 03/08/2026 11:16:47-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Gelson dos Santos Difante (FAMEZ/UFMS)
Avaliador externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pela dádiva da vida e por todos os ensinamentos de vivência e de generosidade. Também a minha família que sempre estiveram comigo a cada momento e etapa construída até chegar a pós-graduação.

Agradeço à minha namorada, Maria de Fátima, por todo o amor, apoio e incentivo ao longo da nossa caminhada, desde a graduação até este momento tão importante. Sua presença foi essencial em cada etapa dessa jornada, especialmente pelas palavras de encorajamento, carinho e confiança que tantas vezes me fortaleceram quando eu mais precisei. Sua companhia tornou esse percurso mais leve, mais bonito e muito mais significativo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel, e meu coorientador, Prof. Dr. Rodrigo Fonseca da Silva, pelo acolhimento, pela confiança e pelos valiosos ensinamentos que, com dedicação e generosidade, contribuíram de forma significativa para minha formação acadêmica e pessoal ao longo desta jornada. Sou grato pela orientação segura, pela paciência e pelo incentivo constante, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento como pesquisador.

Agradeço, com carinho, às amizades que o mestrado me presenteou. Em meio aos desafios, às incertezas e às exigências dessa caminhada, encontrei pessoas que tornaram essa trajetória mais acolhedora e significativa. Sou grato pelas conversas, pela troca de experiências, pelo apoio e pelos sorrisos compartilhados ao longo dessa jornada. Levo comigo não apenas os aprendizados acadêmicos, mas também os laços sinceros que foram construídos e que, sem dúvida, marcaram profundamente esta etapa da minha vida.

À Universidade Federal do Piauí (UFPI), especialmente ao Campus Professora Cinobelina Elvas (CPCE) e ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical, pela oportunidade de formação acadêmica, pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido, indispensável à execução desta pesquisa.

RESUMO GERAL

A limitação hídrica em regiões tropicais constitui um dos principais fatores responsáveis pela estacionalidade da produção de forragem, especialmente em áreas influenciadas pelas condições semiáridas do clima tropical. Nesse contexto, esta dissertação aborda estratégias de mitigação do estresse hídrico em gramíneas forrageiras tropicais, por meio de uma revisão integrativa da literatura e um estudo experimental com *Panicum maximum* cv. BRS Zuri. No primeiro capítulo, foram sintetizadas evidências científicas sobre agentes atenuadores aplicados a gramíneas tropicais, a partir da análise de 28 estudos científicos. Os principais mitigadores identificados foram genótipos tolerantes (29%), rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (25%), silício (18%), fertilizantes e fitormônios (11% cada). A análise indicou predominância de respostas positivas em variáveis fisiológicas, bioquímicas e morfológicas, destacando-se aumentos consistentes nos teores de clorofila, prolina e atividades antioxidantes, além da manutenção do crescimento vegetal e da produção de forragem em grande parte dos estudos. No segundo capítulo, avaliou-se o efeito isolado e combinado de silício e hidrogel nos atributos ecofisiológicos, morfogênicos, produtivos e bromatológicos do capim-zuri sob diferentes níveis de reposição hídrica. Os resultados demonstraram que os mitigadores influenciaram principalmente a integridade celular, o estado hídrico e os pigmentos fotossintéticos, com efeitos mais expressivos sob déficit hídrico severo. A associação entre silício e hidrogel reduziu o vazamento de eletrólitos, favoreceu a manutenção do teor relativo de água e dos teores de clorofilas, além de preservar características morfogênicas e estruturais importantes, como taxa de aparecimento foliar, número de folhas vivas e alongamento foliar. Esses efeitos contribuíram para a manutenção parcial da produção e da qualidade da forragem, mesmo sob condições de restrição hídrica. De forma geral, os resultados evidenciam que a utilização de estratégias integradas de mitigação pode aumentar a resiliência de gramíneas forrageiras tropicais frente à escassez de água, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de sistemas de produção animal mais sustentáveis e adaptados às condições climáticas dos trópicos.

Palavras-chave: aditivos agrícolas; atenuadores de estresse; conservação de umidade; resiliência vegetal.

ABSTRACT

Water limitation in tropical regions is one of the main factors responsible for the seasonality of forage production, especially in areas influenced by the semi-arid conditions of the tropical climate. In this context, this dissertation addresses strategies for mitigating water stress in tropical forage grasses, combining an integrative literature review and an experimental study with *Panicum maximum* cv. BRS Zuri. In the first chapter, scientific evidence on mitigation agents applied to tropical grasses was synthesized based on the analysis of 28 scientific studies. The main mitigators identified were tolerant genotypes (29%), plant growth-promoting rhizobacteria (PGPRs) (25%), silicon (18%), fertilizers, and phytohormones (11% each). The analysis revealed a predominance of positive responses in physiological, biochemical, and morphological traits, with consistent increases in chlorophyll content, proline accumulation, and antioxidant activity, as well as the maintenance of plant growth and biomass production in most studies. In the second chapter, the isolated and combined effects of silicon and hydrogel were evaluated under different levels of water replacement in BRS Zuri guinea grass, considering ecophysiological, morphogenic, productive, and bromatological attributes. The results demonstrated that the mitigators mainly influenced cell membrane integrity, plant water status, and photosynthetic pigments, with more pronounced effects under severe water deficit. The combined application of silicon and hydrogel reduced electrolyte leakage, promoted the maintenance of relative water content and chlorophyll concentrations, and preserved important morphogenic traits such as leaf appearance rate, number of live leaves, and leaf elongation. These effects contributed to the partial maintenance of forage yield and quality even under water-restricted conditions. Overall, the findings demonstrate that the use of integrated mitigation strategies can enhance the resilience of tropical forage grasses to water scarcity, providing support for the development of more sustainable livestock production systems adapted to tropical climatic conditions.

Keywords: agricultural amendments; moisture conservation; plant resilience; stress alleviators.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 9
1 INTRODUÇÃO 11
2 MATERIAL E MÉTODOS 13
3 RESULTADOS 16
4 DISCUSSÃO 25
5 CONCLUSÃO 30
6 REFERÊNCIAS 31
CAPÍTULO 2 39
1 INTRODUÇÃO 41
2 MATERIAL E MÉTODOS 43
3 RESULTADOS 49
4 DISCUSSÃO 60
5 CONCLUSÃO 64
6 REFERÊNCIAS 64

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A disponibilidade de água no solo é um dos principais fatores que determinam o crescimento, a produtividade e o valor nutritivo das gramíneas forrageiras em regiões tropicais. Assim, em sistemas pecuários baseados em pastagens, a irregularidade da distribuição das chuvas representa uma importante limitação à produção de forragem, especialmente em áreas sujeitas a estiagens recorrentes. O déficit hídrico afeta processos fisiológicos e metabólicos das plantas, que resulta na redução do acúmulo de biomassa e da qualidade da forragem, com impactos diretos sobre a eficiência dos sistemas de produção animal.

Entre as espécies de interesse zootécnico, o *Panicum maximum* destaca-se por sua elevada capacidade produtiva, ampla adaptação e importância nos sistemas pastoris tropicais. Entretanto, o desempenho dessa forrageira está estreitamente associado às condições edafoclimáticas, sobretudo à adequada reposição hídrica. Quando submetida ao déficit de água, a planta passa por alterações fisiológicas, estruturais e produtivas que podem limitar a emissão e o alongamento de folhas, acelerar a senescência, reduzir a produção e comprometer o valor nutritivo da forragem. Dessa forma, compreender os efeitos da limitação hídrica sobre essa espécie constitui etapa importante para o avanço de estratégias de manejo mais eficientes.

Diante desse cenário, o uso de tecnologias capazes de reduzir os efeitos do estresse hídrico tem ganhado relevância na pesquisa agropecuária. Entre essas estratégias, destacam-se os polímeros hidroretentores, que atuam na retenção e liberação gradual de água no solo, e o silício, associado à melhoria da tolerância fisiológica das plantas em condições adversas. Enquanto o hidrogel pode contribuir para ampliar a disponibilidade hídrica na zona radicular, o silício tende a favorecer a integridade celular, o equilíbrio hídrico e a manutenção de processos metabólicos importantes para o crescimento vegetal. A atuação complementar desses insumos sugere potencial para atenuar os efeitos da escassez de água em gramíneas forrageiras cultivadas em condições tropicais.

Nesse contexto, esta dissertação aborda estratégias para mitigação do déficit hídrico em gramíneas forrageiras tropicais, por meio de uma revisão integrativa da literatura sobre os principais mitigadores utilizados e um estudo experimental com *Panicum maximum* cv. BRS Zuri. A pesquisa busca ampliar o conhecimento sobre mecanismos e tecnologias capazes de aumentar a tolerância das forrageiras à escassez de água e, contribuir para a sustentabilidade e a estabilidade produtiva dos sistemas pecuários em ambientes tropicais.

CAPÍTULO 1

MITIGADORES DE ESTRESSE HÍDRICO EM GRAMÍNEAS TROPICAIS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

Resumo: Esta revisão integrativa sintetizou o conhecimento sobre mitigadores do estresse hídrico em gramíneas forrageiras tropicais. A busca foi realizada nas bases Web of Science, Scopus e Wiley Library Online, resultou em 28 artigos elegíveis. Os dados foram extraídos e analisados quanto à distribuição geográfica, espécies estudadas, tipos de estresse, variáveis avaliadas e eficácia dos mitigadores. Os resultados mostraram predomínio de estudos no Brasil (25%) e China (21%), com *Zea mays* como a espécie mais frequente (39%). O estresse hídrico foi o mais abordado (54%). Os principais mitigadores identificados foram genótipos tolerantes (29%), rizobactérias promotoras de crescimento vegetal, PGPRs, (25%), silício (18%), fertilizantes e fitormônios (11% cada). As variáveis fisiológicas e morfológicas foram as mais avaliadas (57%). O uso de mitigadores de estresse hídrico provocaram aumentos consistentes em clorofila (100%), prolina (100%), atividades antioxidantes (100%) e altura de plantas (94%), enquanto condutância estomática e peroxidação lipídica apresentaram respostas heterogêneas. A matéria seca aumentou em 57% dos estudos, mas reduziu em 27%, indicando dependência da intensidade do estresse. Conclui-se que, embora existam mitigadores eficazes, sua implementação bem-sucedida em pastagens tropicais exige abordagens integrativas e validação em condições de campo. Recomenda-se ampliar estudos com forrageiras perenes, padronizar níveis de estresse, investigar interações entre mitigadores.

Palavras-chave: Abiótico, atenuadores, bioinsumos microbianos, forragem.

1 INTRODUÇÃO

As pastagens tropicais constituem a base da alimentação animal em países em desenvolvimento, ocupam aproximadamente 1,5 bilhão de hectares globalmente e sustentam a produção de carne e leite em larga escala (FAO, 2025). No entanto, esses ecossistemas são frequentemente submetidos a condições ambientais adversas que limitam a produtividade das gramíneas forrageiras (Dos Santos Neto *et al*., 2023). Entre os estresses mais recorrentes, destaca-se o déficit hídrico, responsável por perdas anuais significativas na produção e na qualidade da forragem, especialmente em regiões sujeitas a secas sazonais ou prolongadas (Amaral *et al*., 2025). Adicionalmente, estresse salino, temperaturas extremas, deficiências nutricionais e contaminação por metais pesados comprometem o desempenho fisiológico e produtivo dessas plantas.

Além disso, as regiões semiáridas ocupam aproximadamente 15% da superfície terrestre e abrigam cerca de 14% da população mundial (Huang *et al*., 2016). Nessas áreas, a agricultura constitui a principal atividade econômica (Liu *et al*., 2008). Entretanto, a irregularidade da distribuição das chuvas, tanto no tempo quanto no espaço, representa um dos principais entraves à produção animal (Silva *et al*., 2021). Nesse contexto, o estresse hídrico destaca-se entre os fatores ambientais que mais limitam o desempenho das forrageiras, pois a má distribuição pluviométrica e a ocorrência de períodos prolongados de seca comprometem o crescimento, a persistência e a produtividade das pastagens, afetando diretamente a sustentabilidade dos sistemas de produção animal nessas regiões.

O déficit hídrico afeta processos fisiológicos fundamentais, como a redução da taxa fotossintética, alterações no balanço hídrico celular e limitações na absorção e no transporte de nutrientes, que resulta em menor acúmulo e compromete a qualidade nutricional da forragem (Amaral *et al*., 2025; Bista *et al*., 2018). Adicionalmente, a restrição hídrica intensifica o estresse oxidativo e reduz a eficiência no uso da água, fatores que contribuem para a queda na produtividade e na resiliência das plantas forrageiras.

Como consequência, os efeitos cumulativos desses processos refletem-se na diminuição da capacidade de rebrota, na redução da longevidade das pastagens e no avanço dos processos de degradação, caracterizados pela perda de vigor, menor cobertura do solo e redução da eficiência na ciclagem de nutrientes (Bista *et al*., 2018; Smit *et al*., 2025). Essas condições comprometem a estabilidade produtiva dos sistemas pecuários e

ampliam os impactos ambientais associados, como a degradação do solo e a redução da biodiversidade funcional.

Diante dessas limitações, observa-se um avanço significativo no desenvolvimento de estratégias voltadas à mitigação dos efeitos do déficit hídrico em sistemas pastoris. Entre as abordagens mais investigadas, destaca-se o uso de bioestimulantes e reguladores de crescimento, associados ao aumento da tolerância das plantas a estresses abióticos por meio da modulação de processos fisiológicos e metabólicos (Du Jardin, 2015; Rouphael; Colla, 2020). Paralelamente, o emprego de microrganismos promotores de crescimento vegetal tem sido amplamente investigado como alternativa sustentável para melhorar a eficiência no uso da água e a absorção de nutrientes, e contribuem para maior adaptação das plantas a condições de limitação hídrica (Vurukonda *et al*., 2016).

Apesar dos avanços recentes, ainda existem lacunas relacionadas à compreensão dos mecanismos de ação desses agentes em gramíneas forrageiras tropicais, bem como à mensuração consistente de seus efeitos sobre a produtividade e a qualidade da biomassa em condições de campo. A heterogeneidade dos resultados reportados na literatura, como exemplo a melhora dos pigmentos fotossintéticos e aumento na produção de biomassa, associada à diversidade de produtos e condições edafoclimáticas, reforça a necessidade de síntese crítica do conhecimento disponível.

A revisão integrativa representa uma metodologia ampla e rigorosa, bastante empregada para reunir e sintetizar o conhecimento científico disponível sobre um tema específico. No caso da avaliação de mitigadores de estresse em pastagens tropicais, a revisão integrativa é estratégica, pois viabiliza a união de resultados de pesquisas fisiológicas, bioquímicas, agronômicas e zootécnicas, proporciona uma perspectiva integrada dos mecanismos de mitigação e de seus efeitos no desempenho das forrageiras e dos sistemas produtivos (Whittemore; Knafl, 2005). Assim, ao compilar e avaliar criticamente evidências dispersas na literatura, a revisão integrativa reforça a base científica da investigação, aprimora a confiança nas conclusões com respostas consistentes e aplicáveis.

Nesse contexto, objetivou-se com essa revisão sintetizar o conhecimento científico acerca de mitigadores do estresse hídrico em gramíneas forrageiras tropicais, com ênfase na identificação dos principais agentes utilizados, na compreensão de seus mecanismos de ação relacionados à tolerância ao estresse hídrico em forrageiras e na avaliação de seus efeitos sobre a produtividade e a qualidade da forragem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a definição da questão de pesquisa, adotou-se a estratégia mnemônica PVO (População, Variável e Desfecho), conforme recomendações metodológicas para síntese de evidências. A questão norteadora formulada foi: “Quais são os principais mitigadores e suas características na mitigação do estresse hídrico em gramíneas tropicais?”. Nesse contexto, a população (P) foi composta por gramíneas forrageiras tropicais, a variável de interesse (V) correspondeu aos agentes mitigadores de estresse, e o desfecho (O) incluiu as respostas fisiológicas, bioquímicas e produtivas observadas.

O processo de busca foi conduzido de forma independente por dois pesquisadores, até o dia 14 de março de 2026. A estratégia de busca foi estruturada com base em descritores controlados e seus respectivos sinônimos (Tabela 1), organizados de acordo com os componentes da estratégia PVO.

	Descritores
P	"Tropical forage grasses" OR "Forage crops" OR "C4 grasses" OR "Crops forage" OR "Fodder" OR "Grass" OR "Grasses" OR "Forage grasses" OR "Grasses forage" OR "Pasture" OR "Tropical pasture" OR "Pasture tropical" OR "Tropical" OR "Forages" OR "Forage" OR "*Brachiaria*" OR "*Urochloa*" OR "*Panicum*" OR "*Megathyrsus*" OR "*Cynodon*" OR "*Pennisetum*" OR "Foragers" OR "Tropical forages" OR "Forages tropical" OR "Grass tropical" OR "Tropical grass" OR "Guinea grass".
V	"Stress mitigation" OR "Drought mitigation" OR "Alleviation of water stress" OR "Stress tolerance enhancers" OR "Stress protectants" OR "Abiotic stress mitigators" OR "Water stress alleviation" OR "Improvement of drought tolerance" OR "Drought-resilience strategies" OR "Soil moisture conservation practices
O	"Post-stress" OR "Post-drought" OR "Rehydration" OR "Osmotic adjustment" OR "Water potential recovery" OR "Cell turgor restoration" OR "Post-drought response" OR "Resilience" OR "Plant persistence" OR "Stress memory" OR "Acquired tolerance" OR "Productivity recovery" OR "Yield recovery" OR "Regrowth capacity" OR "Anatomical changes" OR "Structural recovery" OR "Tissue remodeling" OR "Antioxidant system" OR "ROS scavenging" OR "Oxidative stress recovery" OR "Morphological plasticity" OR "Root plasticity" OR "Shoot regrowth" OR "Compensatory growth" OR "Regrowth" OR "Biomass recovery" OR "Post-water deficit" OR "Photosynthesis" OR "Photosynthetic recovery" OR "Gas exchange" OR "Chlorophyll fluorescence" OR "Physiological recovery" OR "Plant recovery" OR "Rehydration response"

Tabela 1: Termos para elaboração da questão norteadora e construção da estratégia de busca.

O protocolo da revisão foi desenvolvido com o intuito de garantir rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade, e seguiu as recomendações adaptadas do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses-PRISMA* (Page *et al*., 2021). A busca na literatura foi realizada por meio do Portal de Periódicos CAPES, por meio do acesso institucional da Universidade Federal do Piauí (UFPI, Brasil). Foram

selecionadas três bases de dados eletrônicas, devido à sua ampla cobertura científica: Web of Science (Clarivate Analytics), Scopus (Elsevier) e Wiley Online Library.

Os critérios de elegibilidade foram definidos previamente. Foram incluídos apenas artigos científicos completos, publicados como estudos experimentais, independentemente do idioma e do ano de publicação, com o objetivo de garantir uma análise abrangente da literatura disponível. Foram excluídos artigos de revisão, resumos de eventos, teses, dissertações, monografias, editoriais, cartas ao editor, opiniões de especialistas e capítulos de livros.

O processo de seleção dos estudos foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa, procedeu-se à triagem dos títulos e resumos pelos revisores, de forma independente, com o objetivo de identificar estudos potencialmente relevantes. Na segunda etapa, os artigos selecionados foram avaliados na íntegra e reanalisados com base nos critérios de elegibilidade estabelecidos. Eventuais divergências entre os revisores foram resolvidas por consenso.

Para a extração dos dados, foi elaborado um formulário padronizado, visando à coleta sistemática das informações relevantes de cada estudo. Foram extraídos dados referentes à identificação das publicações (título, autores, país, idioma, ano de publicação e base de dados indexadora), nome do periódico e características metodológicas (delineamento experimental, tratamentos, período experimental, variáveis avaliadas e principais resultados). Adicionalmente, foram coletadas informações sobre as espécies forrageiras submetidas ao estresse, limitações dos estudos e conclusões apresentadas.

A qualidade metodológica dos estudos incluídos foi avaliada por meio das ferramentas do *Critical Appraisal Skills Programme - CASP* (CASP, 2023), adaptadas ao delineamento de cada estudo. Além disso, os estudos foram classificados quanto ao nível de evidência, com base nos critérios do *Joanna Briggs Institute* (JBI, 2017). Foram incluídos apenas estudos classificados como nível 2 ou superior (estudos experimentais e quase-experimentais), para assegurar o equilíbrio entre rigor metodológico e abrangência da evidência científica.

Após a leitura completa dos estudos selecionados, foram excluídos aqueles que não apresentaram alinhamento com a questão de pesquisa ou que não atenderam aos critérios metodológicos estabelecidos. A amostra final foi composta por estudos que forneceram dados consistentes e confiáveis para a síntese qualitativa das evidências.

3 RESULTADOS

A estratégia de busca realizada nas bases Web of Science, Wiley Online Library e Scopus recuperou um total de 918 registros. Após a aplicação do filtro para artigos com acesso aberto, foram identificados 760 artigos. Na fase de triagem por títulos, resumos e palavras-chave, 108 artigos foram selecionados para leitura na íntegra. Durante a leitura completa, foram excluídos 8 artigos duplicados. Subsequentemente, 72 artigos foram descartados por não responderem à questão norteadora ou não atenderem aos critérios de inclusão estabelecidos. Ao final do processo de extração de dados, 28 artigos foram incluídos na revisão integrativa (Figura 1).

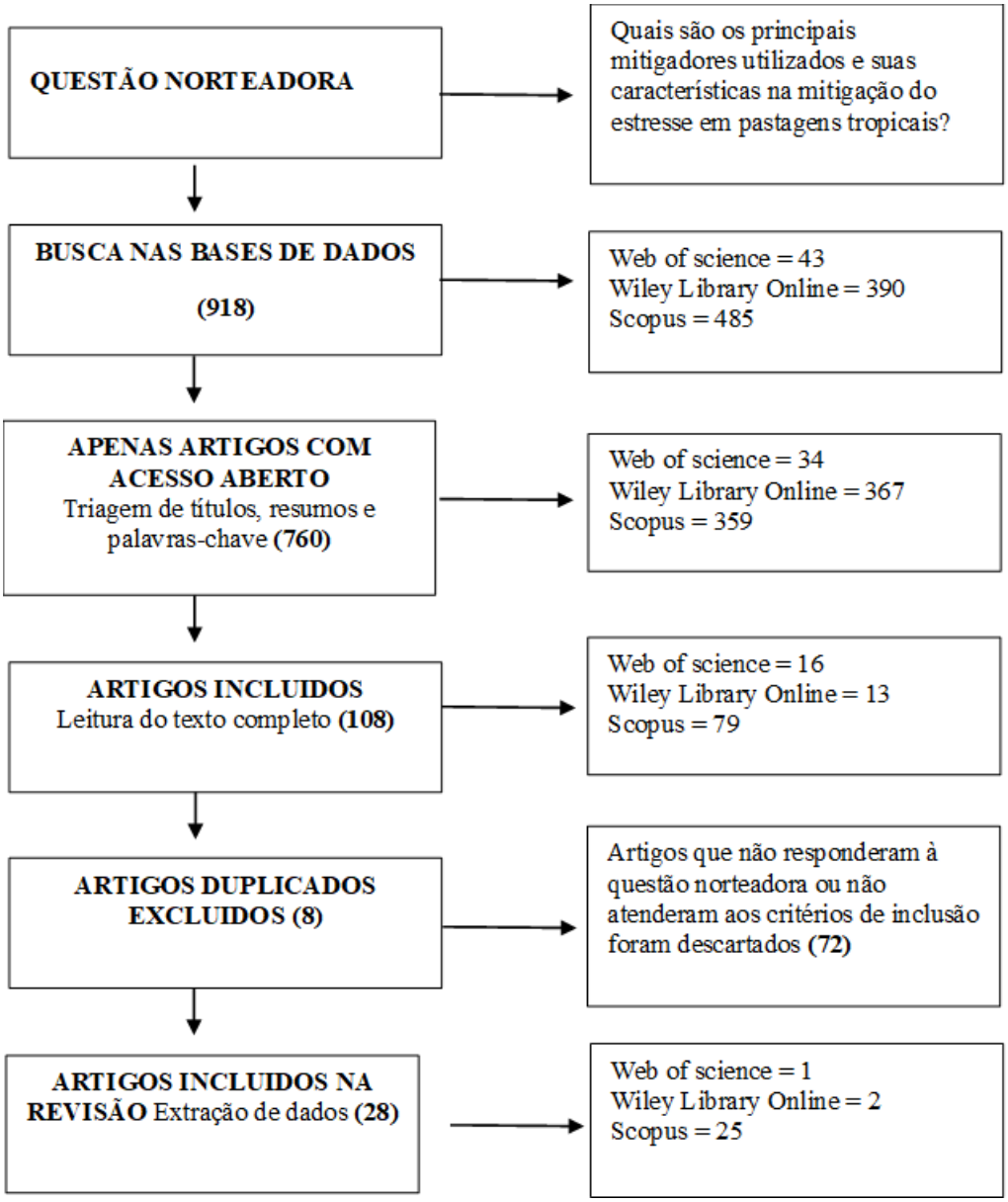


Figura 1: Fluxograma da revisão integrativa.

O Brasil concentrou o maior número de publicações (7: 25%), seguido por China (6: 21%), Alemanha (4: 14%), Índia e Paquistão (2 cada: 7%), Estados Unidos, Egito, Austrália, Irã, Senegal, México, Quênia, Zimbábue e Jordânia contribuíram com um estudo cada (4% cada). A espécie mais frequente foi *Zea mays* L. (11: 39%), seguida por *Pennisetum* spp. (7: 25%), *Sorghum* spp. (3: 11%), *Brachiaria* e *Cynodon* (2 cada: 7%), *Panicum maximum*, *Saccharum officinarum* e *Digitaria pentzii* apareceram em um estudo cada (4% cada), (Tabela 2).

Tabela 2: Aspectos metodológicos e distribuição dos estudos incluídos na revisão integrativa.

Aspectos metodológicos	Distribuição dos estudos	Estudos (%)
País	Brasil: 7	25%
	China: 6	21%
	Alemanha: 4	14%
	Índia e Paquistão: 2	7%
	Estados Unidos, Egito, Australia, Irã, Senegal, México, Quênia, Zimbábue e Jordânia: 1	4%
Gramíneas	*Zea mays L.*: 11	39%
	Pennisetum: 7	25%
	Sorghum: 3	11%
	Brachiaria e *Cynodon:* 2	7%
	Megathyrsus maximus, Saccharum officinarum e *Digitaria pentzii:* 1	4%
Tipo de estresse	Estresse hídrico: 15	54%
	Estresse salino, estresse por frio e estresse nutricional: 3	11%
	Estresse biótico, estresse químico, estresse por metais pesados e alta demanda evaporativa: 1	4%
Variáveis avaliadas	Fisiológicas e Morfológicas: 16	57%
	Bioquímicas: 12	43%
	Produtivas, Nutrição mineral e Genéticas: 7	25%
	Microbiológicas/Sanidade: 4	14%
Delineamento experimental	DIC: 17	60,72%
	DBC: 11	39,28%

Legenda: DIC=Delineamento Inteiramente casualizado, DBC= Delineamento em Blocos Casualizados.

O estresse hídrico foi o mais abordado (15: 54%), estresse salino, estresse por frio e estresse nutricional foram registrados em três estudos cada (11% cada), estresse biótico (herbívoria), estresse químico, estresse por metais pesados e alta demanda evaporativa apareceram em um estudo cada (4% cada). Variáveis fisiológicas e morfológicas foram contempladas em 16 estudos (57%), variáveis bioquímicas em 12 estudos (43%),

variáveis produtivas, de nutrição mineral e genéticas em sete estudos (25%), variáveis microbiológicas ou de sanidade em quatro estudos (14%). O delineamento inteiramente casualizado (DIC) foi utilizado em 17 estudos (60,72%), o delineamento em blocos casualizados (DBC) em 11 estudos (39,28%).

Além de identificar os tipos de estresse mais estudados e as variáveis avaliadas, a análise também revelou quais estratégias ou agentes mitigadores são avaliados nas plantas (Figura 2).

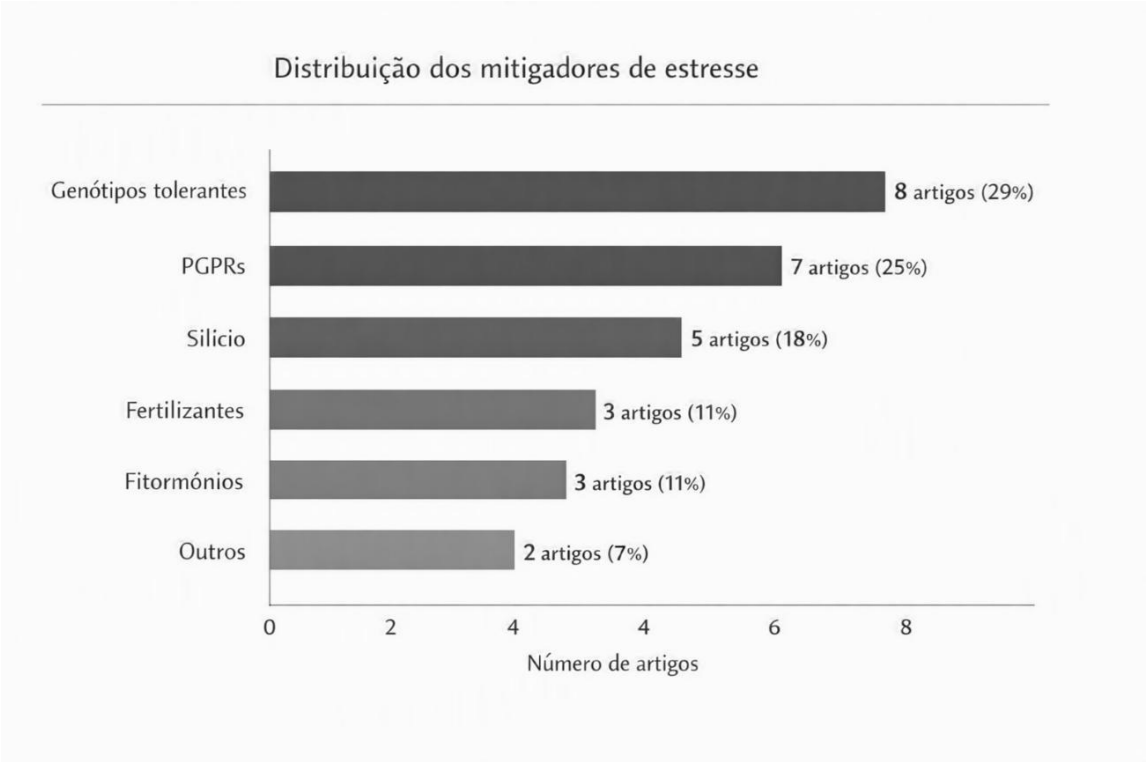


Figura 2: Frequência absoluta e relativa dos mitigadores de estresse identificados nos estudos incluídos na revisão integrativa (n = 28).

Em relação aos principais mitigadores de estresse identificados nos 28 estudos incluídos na revisão integrativa, os genótipos tolerantes foram os mais frequentes, sendo relatados em oito artigos (29%). Em seguida, destacaram-se as rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPRs), presentes em sete artigos (25%), e o silício, mencionado em cinco artigos (18%). Fertilizantes e fitormônios foram identificados em três artigos cada, correspondendo a 11% do total para cada categoria. Outros mitigadores, não enquadrados nas categorias anteriores, foram registrados em dois artigos (7%). Dessa forma, a apresentação conjunta do número de artigos e da frequência relativa permite indicar simultaneamente a ocorrência absoluta de cada mitigador e sua representatividade no conjunto dos estudos analisados.

Os resultados analisados também permitiram sintetizar as características avaliadas nos estudos que testaram mitigadores de estresse em gramíneas tropicais. Na Tabela 3, as características foram agrupadas em variáveis fisiológicas, bioquímicas, morfológicas, produtivas e de nutrição mineral. Para cada característica, são apresentados o número de estudos em que foi avaliada, sua frequência dentro do respectivo grupo de variável e a direção da resposta observada com a aplicação do mitigador, classificada como aumento, ausência de efeito significativo ou redução em comparação à condição de estresse sem mitigação.

Também foram analisados os principais mitigadores avaliados, as respectivas gramíneas tropicais estudadas e as respostas documentadas nos artigos incluídos (n = 28), conforme extração dos dados (Tabela 4).

Tabela 3. Frequência das características avaliadas nos estudos incluídos e direção das respostas observadas após a aplicação dos mitigadores de estresse em comparação à condição de estresse sem mitigação.

Variáveis	Características avaliadas	Nº de estudos	Frequência dentro da categoria (%)	Direção da resposta com o mitigador (%)		
				Aumento	Não significativo	Redução
Fisiológicas (n = 16)	Clorofila	10	63	100	0	0
	Conteúdo relativo de água	5	31	100	0	0
	Condutância estomática	5	31	40	20	40
Bioquímicas (n = 12)	Prolina	7	38	100	0	0
	Enzimas/atividades antioxidantes	6	44	100	0	0
	Peroxidação lipídica	4	25	50	0	50
Morfológicas (n = 16)	Altura de plantas	16	100	94	0	6
	Comprimento de raízes	8	50	75	12,5	12,5
	Área foliar	5	31	60	40	0
Produtivas (n = 7)	Matéria seca (raiz e parte aérea)	7	100	57	14	27
	Índices produtivos	6	86	67	33	0
	Fibras	3	43	100	0	0
	Nitrogênio	7	100	86	14	0

Nutrição mineral (n = 7)	Acúmulo de Silício	3	43	100	0	0
	Estado nutricional	3	43	100	0	0

Nota: O número entre parênteses ao lado de cada grupo de variável indica o total de estudos que avaliaram aquela categoria. A coluna “Nº de estudos” apresenta quantos estudos avaliaram cada característica específica. A coluna “Frequência dentro da categoria (%)” corresponde à proporção de estudos que avaliaram a característica dentro do respectivo grupo. As colunas “Aumento”, “Não significativo” e “Redução” indicam a direção da resposta observada após o uso do mitigador, considerando apenas os estudos que avaliaram aquela característica.

Tabela 4. Síntese dos principais mitigadores avaliados, respectivas gramíneas tropicais e as respostas documentadas.

Mitigador	Gramíneas Tropicais	Respostas
PGPRs	*Panicum maximum*	Elevou a produtividade, otimizou a nutrição mineral, diminuiu os custos relacionados ao uso de nitrogênio e favoreceu a sustentabilidade dos sistemas de pastagens.
	Brachiaria brizantha e ruziziensis	Aumentaram a biomassa, otimizaram a fotossíntese e elevaram o acúmulo de nitrogênio em *Brachiaria*.
	Zea mays	Fortaleceu as defesas antioxidantes, melhorou o crescimento radicular, ajustou hormônios e aumentou a absorção de nutrientes. Também ativou a resistência sistêmica, elevou a fotossíntese e a produtividade, mitigou o estresse hídrico e salino, além de favorecer a tolerância ao frio em ambientes semiáridos.
Seleção de Genótipo Tolerante	*Cynodon dactylon*	Apresentou melhor desempenho morfológico, maior eficiência fotossintética, maior eficiência do uso da água, respostas antioxidantes mais equilibradas e expressão gênica favorável.
	Pennisetum	Apresentou transpiração reduzida, eficiência elevada, exsudação mínima, raízes funcionais e ativação de miRNAs e genes protetores contra a seca.
	Sorghum bicolor	Garantiu fotossíntese eficiente, fotoproteção, alta capacidade antioxidante, menor senescência e melhor uso da água.
	Zea mays	Apresentou menor redução de produtividade, maior estabilidade entre ambientes, maior atividade de enzimas antioxidantes, transcrição reguladora de estômatos, metabolismo de nitrogênio e lipoxigenase.
Silício	*Pennisetum*	Aumentou o crescimento, melhorou a fotossíntese, reduziu o estresse oxidativo, fortaleceu o sistema antioxidante, aumentou os compostos protetores e melhorou a absorção de nutrientes.
	Saccharum officinarum	Aumentou a absorção de Si e P, melhorou a eficiência de uso de C, N e P, aumentou a biomassa de folhas e colmos, reduziu os danos do estresse, restabeleceu a homeostase C:N:P e elevou a produtividade em diferentes solos.
	Zea mays	Fortaleceu a fisiologia, aumentou os antioxidantes, melhorou a nutrição, equilibrou os hormônios, reduziu os danos de estresses abióticos e promoveu maior crescimento, vigor e produtividade.

Fitormônio	*Pennisetum*	Atuou como regulador, modulou o ácido abscísico ao longo do tempo e interagiu com auxinas, citocininas, ácido salicílico e jasmonatos; ativou vias de defesa hormonal, melhorou o crescimento, reprogramou o balanço hormonal, reduziu hormônios de estresse e aumentou hormônios de crescimento e defesa.
Fertilizantes	*Zea mays*	Aumentou a nutrição, melhorou o estado hídrico, fortaleceu o metabolismo, reduziu danos por estresse e aumentou a produtividade e a qualidade.

4 DISCUSSÃO

A análise revelou que o estresse hídrico foi o fator ambiental mais investigado (54% dos estudos), a literatura identificou a seca como o principal limitante da produtividade de gramíneas tropicais. A concentração de publicações provenientes do Brasil (25%) e da China (21%) reflete a importância econômica das pastagens cultivadas nessas regiões, onde a pecuária extensiva enfrenta desafios crescentes devido à irregularidade das chuvas e à degradação das pastagens.

Um terço dos estudos (39%) concentrou-se em milho (*Zea mays*), uma cultura anual, o que sugere um viés de pesquisa. Embora o milho seja amplamente utilizado para silagem e grãos, as pastagens perenes tropicais de maior importância econômica, como as dos gêneros *Brachiaria*, *Panicum* e *Pennisetum*, foram menos abordadas. *Zea mays* responde favoravelmente ao silício e às PGPRs, com mecanismos bem documentados e descritos. Essa assimetria na distribuição das espécies estudadas limita a extrapolação dos resultados para o contexto real das pastagens tropicais, que são manejadas em sistemas perenes sujeitos a desfolhas sucessivas e competição interespecífica (Badgery *et al*., 2024). Há o risco de que estratégias eficazes para o milho não apresentem o mesmo desempenho em pastagens cultivadas devido às diferenças na arquitetura do sistema radicular, na longevidade das folhas e nas respostas fisiológicas ao pastejo.

A elevada frequência de estudos com milho (*Zea mays*) e a expressiva participação da China entre os países de origem das publicações indicam uma concentração da produção científica em culturas anuais de grande importância agrícola e em regiões com forte investimento em pesquisas sobre estresses abióticos. Embora o milho não represente diretamente o contexto das pastagens tropicais perenes, sua inclusão se justifica por pertencer à família Poaceae, apresentar metabolismo C4 e compartilhar mecanismos fisiológicos relevantes de resposta ao déficit hídrico, como regulação estomática, ajuste osmótico, manutenção dos pigmentos fotossintéticos e ativação do sistema antioxidante. A presença expressiva de estudos conduzidos na China, por sua vez, provavelmente reflete o elevado volume de pesquisas agrícolas voltadas à segurança alimentar, ao manejo da seca e ao uso de tecnologias mitigadoras em culturas estratégicas. Assim, esses resultados não indicam necessariamente maior representatividade das pastagens tropicais chinesas, mas evidenciam a intensidade da produção científica do país em gramíneas cultivadas sob estresses abióticos. Essa predominância reforça a necessidade de cautela na extrapolação dos resultados obtidos em

milho para gramíneas forrageiras perenes, como *Brachiaria*, *Panicum*, *Urochloa* e *Pennisetum*, que diferem quanto ao ciclo de vida, perfilhamento, manejo, persistência e resposta ao pastejo.

A predominância do DIC é típica de experimentos em casa de vegetação ou câmaras de crescimentos, os quais permitem alto controle ambiental, mas têm validade ecológica limitada. A literatura recomenda fortemente que estudos de mitigação de estresse incluam blocos para controlar a variabilidade ambiental.

A seleção de genótipos tolerantes foram o mitigador mais frequente (29% do total), refletindo uma abordagem consolidada na literatura. A seleção de genótipos superiores baseia-se em mecanismos clássicos de tolerância à seca. Para *Cynodon dactylon*, o melhor desempenho está associado a maior eficiência fotossintética e uso da água, atributos que permitem que genótipos tolerantes mantenham taxas fotossintéticas mais altas sob déficit hídrico em comparação com genótipos sensíveis (Duarte *et al*., 2020; Vezzone *et al*., 2025). Em *Pennisetum glaucum*, a tolerância envolve mecanismos regulatórios complexos, com miRNAs que modulam a expressão de genes envolvidos em processos metabólicos e catalíticos, ajustando o metabolismo vegetal à condição de estresse. As respostas antioxidantes são uma base molecular comum para a tolerância à seca, como evidenciado também em estudos de melhoramento vegetal (Achon *et al*., 2025). Embora seja a estratégia mais robusta, a seleção de genótipos tolerantes apresenta limitações práticas significativas. Primeiro, o melhoramento genético convencional é lento, especialmente para espécies forrageiras perenes poliploides como as braquiárias. Segundo, a adaptação local pode restringir a transferibilidade de genótipos selecionados de um ambiente para outro.

As PGPRs foram o segundo mitigador mais frequente (25% dos estudos). Os mecanismos documentados incluem produção de fitormônios como ácido indol-3-acético, melhoria da absorção de nutrientes e modulação das respostas de defesa (Hasan *et al*., 2024; Pieterse *et al*., 2012). Em *Brachiaria brizantha*, a inoculação com *Azospirillum brasilense* associada à fertilização nitrogenada aumenta a biomassa, otimiza a fotossíntese e eleva o acúmulo de nitrogênio, permitindo redução do uso de fertilizantes nitrogenados (Cassán; Diaz-Zorita, 2016; Hasan *et al*., 2024) Embora as evidências experimentais mais consistentes tenham sido obtidas em gramíneas do gênero *Urochloa* (Brachiaria), estudos demonstram que bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR), especialmente *Azospirillum brasilense*, aumentam a eficiência do uso do nitrogênio, podendo substituir parte da adubação nitrogenada. Considerando que *Panicum maximum* apresenta elevada resposta à

fertilização nitrogenada, a utilização de PGPR representa uma estratégia promissora para reduzir custos de produção e aumentar a sustentabilidade dos sistemas pastoris tropicais (Hungria, 2016).

Um aspecto crítico que merece destaque é a variabilidade na eficácia das PGPRs. Respostas positivas consistentes dependem de fatores como cepa bacteriana, modo de inoculação, tipo de solo e condição de estresse. Na presente revisão, todos os estudos que avaliaram PGPRs encontraram respostas positivas. Estudos de campo de longa duração são escassos; a maioria dos experimentos é realizada em vasos ou em ciclos curtos, o que limita a compreensão da persistência e da eficácia das PGPRs sob pastejo real, onde a comunidade microbiana da rizosfera sofre perturbações constantes (Glick, 2012).

O silício foi relatado em 18% dos artigos, atuando como mitigador de múltiplos estresses. Em *Pennisetum glaucum*, a aplicação foliar de silício sob estresse hídrico aumentou o teor relativo de água, os teores de clorofila e a atividade de enzimas antioxidantes, com simultânea redução do estresse oxidativo (Wasaya *et al*., 2010). Em *Saccharum officinarum*, o silício atenuou os efeitos do déficit hídrico severo ao aumentar o conteúdo relativo de água e o potencial hídrico, diminuindo o estresse oxidativo e modificando a estequiometria C:N:P, o que elevou a eficiência de uso desses nutrientes e o crescimento (Ma; Yamaji, 2006).

O silício oferece vantagens práticas por ser um elemento abundante, de baixo custo e passível de aplicação via fertirrigação ou pulverização foliar. No entanto, persistem lacunas importantes. O mecanismo molecular exato pelo qual o silício regula a expressão gênica sob estresse ainda é parcialmente desconhecido (Coskun *et al*., 2019; Fauteux *et al*., 2006). Além disso, a literatura indica que faltam estudos sobre sua aplicação em condições de campo e seu impacto direto na fisiologia e na viabilidade econômica da produção (Alayafi *et al*., 2022). Outro ponto crítico é que os efeitos do silício variam conforme a espécie e o tipo de solo, sendo mais pronunciado em solos com baixa disponibilidade natural do elemento, o que limita a generalização dos resultados.

Fitormônios e fertilizantes apareceram cada um em 11% dos estudos. A aplicação exógena de fitormônios em *Pennisetum* modula o ácido abscísico (ABA) ao longo do tempo e interage com auxinas e citocininas, ativando vias de defesa e reprogramando o balanço hormonal (Waadt *et al*., 2022). O ABA é central na sinalização de déficit hídrico, induzindo o fechamento estomático e regulando a expressão de genes de resposta à seca (Vishwakarma *et al*., 2017). As combinações hormonais podem apresentar maior eficácia do que a administração

de hormônios isolados, entretanto, essa interação permanece em grande parte inexplicada na literatura científica.

Os fertilizantes nitrogenados, por sua vez, emergiram como estratégia complementar em milho (a única gramínea em que foram testados como mitigadores), melhora a nutrição, e o estado hídrico da planta e reduz danos por estresse. Contudo, o manejo da adubação nitrogenada em pastagens tropicais perenes ainda é baseado em quantidades anuais fixas, sem definição de recomendações mais precisas por estágio fenológico (Jiménez *et al*., 2015; Pezzopane *et al*., 2017).

As variáveis morfofisiológicas foram as mais avaliadas (57%). Os aumentos consistentes nos teores de clorofila, prolina e na atividade de enzimas antioxidantes após aplicação dos mitigadores indicam que esses parâmetros são sensíveis e confiáveis (Ashraf; Foolad, 2007; Mittler, 2002). Entretanto, a homogeneidade dos resultados para clorofila (100% aumento) e prolina (100% aumento) deve ser interpretada com cautela, em alguns casos, o aumento da prolina pode ser uma consequência, do estresse, e não necessariamente um indicador de maior tolerância.

Por outro lado, a condutância estomática e a peroxidação lipídica apresentaram respostas contraditórias. O fato de 40% dos estudos terem reportado redução na condutância estomática com o mitigador (indicando fechamento estomático, o que indica um efeito benéfico por reduzir a perda de água) ou 40% de aumento (indicando abertura estomática, o que é benéfico para a fotossíntese) revela que o sentido da resposta é dependente do estresse e do tipo de mitigador (Chaves; Maroco; Pereira, 2003; Farooq *et al*., 2009). Essa heterogeneidade sinaliza que a interpretação de variáveis ‘sinal’ deve levar em conta o momento da medição e a intensidade do estresse.

As variáveis produtivas merecem atenção especial. Embora a matéria seca tenha aumentado em 57% dos estudos, houve redução em 27%. Isso sugere que, em determinadas condições (provavelmente estresse muito severo ou uso de dose/subdose inadequada do mitigador), a mitigação pode ser insuficiente para reverter as perdas (Munns; Tester, 2008). A ausência de padronização nos níveis de estresse, como exemplo diferentes potenciais hídricos do solo, inviabiliza comparações diretas de eficácia entre mitigadores.

Cabe destacar que esta revisão fornece uma síntese atualizada das principais estratégias de mitigação do estresse hídrico em gramíneas tropicais, identifica lacunas de conhecimento e estabelece uma base científica para o senvolvimento de tecnologias capazes de aumentar a

resiliência e a sustentabilidade dos sistemas de produção animal em ambientes tropicais. Embora existam mitigadores eficazes, sua implementação exitosa em pastagens tropicais exige abordagens integrativas e validação em cenários reais de produção.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que, as principais estratégias evidenciadas para mitigar os efeitos do déficit hídrico em gramíneas tropicais são genótipos tolerantes, PGPRs, silício e fitormônios, pois promovem melhorias consistentes em atributos fisiológicos, bioquímicos e morfológicos relacionados à tolerância ao estresse. Apesar dos avanços, a literatura ainda apresenta importante concentração de estudos em espécies anuais e em condições controladas, o que restringe a extrapolação dos resultados para sistemas pastoris tropicais. O avanço do conhecimento depende da realização de estudos em gramíneas forrageiras perenes, sob condições de campo e pastejo, da padronização dos protocolos experimentais e da avaliação integrada da eficiência agronômica, econômica e ambiental das diferentes estratégias de mitigação.

6 REFERÊNCIAS

ACHON, I. *et al*. Integrating molecular insights on stress responses and agronomic traits for breeding in forage grasses. **Crop & Pasture Science**, v. 77, n. 1, 2025.

ALAYAFI, A. H. *et al*. Silicon supplementation enhances productivity, water use efficiency and salinity tolerance in maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 953451, 2022.

AMARAL, D. S. *et al.* Nutritional imbalances and reduced forage production under intra-seasonal drought are alleviated by irrigation in tropical forage grasses. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 1-16, 2025.

ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 59, n. 2, p. 206-216, 2007.

BADGERY, W. *et al*. Tropical pastures add value to grazing systems in temperate environments of Eastern Australia. **Field Crops Research**, v. 312, p. 109402, 2024.

BISTA, D. R. *et al*. Effects of drought on nutrient uptake and the levels of nutrient-uptake proteins in roots of drought-sensitive and drought-tolerant grasses. **Plants**, v. 7, n. 2, 2018.

CRITICAL APPRAISAL SKILLS PROGRAMME (CASP). **CASP Case Control Study Checklist**. [S.l.]: CASP, 2023.

CASSÁN, F.; DIAZ-ZORITA, M. Azospirillum sp. in current agriculture: from the laboratory to the field. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 103, p. 117-130, 2016.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought: from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, v. 30, n. 3, p. 239-264, 2003.

COSKUN, D. *et al*. The controversies of silicon's role in plant biology. **New Phytologist**, v. 221, n. 1, p. 67-85, 2019.

DOS SANTOS NETO, C. F. *et al*. Shading effect and forage production of tropical grasses in Brazilian semi-arid silvopastoral systems. **Agroforestry Systems**, v. 97, n. 6, p. 995-1005, 2023.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 3-14, 2015.

DUARTE, C. F. D. *et al*. Morphogenetic and structural characteristics of *Brachiaria* species under inoculation with plant-growth-promoting bacteria and nitrogen fertilization. **Crop and Pasture Science**, v. 71, n. 1, p. 82-89, 2020.

FAO. **Land statistics 2001-2023: global, regional and country trends**. Rome: FAO, 2025. (FAOSTAT Analytical Briefs, n. 107).

FAROOQ, M. *et al*. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, n. 1, p. 185-212, 2009.

FAUTEUX, F. *et al*. The protective role of silicon in the Arabidopsis-powdery mildew pathosystem. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 46, p. 17554-17559, 2006.

GLICK, B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica**, v. 2012, p. 963401, 2012.

HASAN, A. *et al*. Role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as a plant growth enhancer for sustainable agriculture: a review. **Bacteria**, v. 3, n. 2, p. 59-75, 2024.

HUANG, J. *et al*. Global semi-arid climate change over last 60 years. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 3-4, p. 1131-1150, 2016.

HUNGRIA, M. **Azospirillum: um velho novo aliado**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 32.; REUNIÃO BRASILEIRA DE MICORRIZAS, 16.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 14.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 11., 2016, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

JOANNA BRIGGS INSTITUTE. **JBI critical appraisal tools**. Adelaide: JBI, 2017.

LIU, H. *et al*. Climatic and anthropogenic controls of topsoil features in the semi-arid East Asian steppe. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 4, 2008.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 651-681, 2008.

PAGE, M. J. *et al*. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, p. n160, 2021.

PEZZOPANE, C. de G. *et al*. Evaluation and strategies of tolerance to water stress in *Paspalum* germplasm. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 5, n. 3, p. 153-162, 2017.

PIETERSE, C. M. J. *et al*. Hormonal modulation of plant immunity. **Annual Review of Cell and Developmental Biology**, v. 28, p. 489-521, 2012.

ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Editorial: biostimulants in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 40, 2020.

SILVA, M. G. da T. *et al*. Use of spineless cactus associated with legume hay in the feedlot-finishing of lambs in semi-arid regions. **PLoS ONE**, v. 16, n. 12, 2021.

SMIT, M. *et al*. Drought impact on the nutrients of forage plants in a semi-arid rangeland and its potential implications for sustaining herbivores. **Journal of Arid Environments**, v. 227, p. 105299, 2025.

VEZZONE, M. *et al*. Nitrogen use efficiency in marandu palisadegrass (*Brachiaria brizantha*) during dry seasons in Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 48, n. 9, p. 1472-1484, 2025.

VISHWAKARMA, K. *et al*. Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: a review on current knowledge and future prospects. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 228798, 2017.

VURUKONDA, S. S. K. P. *et al*. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. **Microbiological Research**, v. 184, p. 13-24, 2016.

WAADT, R. *et al*. Plant hormone regulation of abiotic stress responses. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 23, n. 10, p. 680-694, 2022.

WASAYA, A. *et al*. Foliar application of silicon improved physiological indicators, yield attributes, and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) under terminal drought stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 4458-4472, 2022.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.

CAPÍTULO 2

A APLICAÇÃO COMBINADA DE HIDROGEL E SILÍCIO ATENUA OS EFEITOS DO ESTRESSE HÍDRICO SEVERO EM *Panicum maximum* cv. BRS ZURI

Resumo: Este estudo avaliou os efeitos isolados e combinados do uso de silício e hidrogel na mitigação do estresse hídrico em *Panicum maximum* cv. BRS Zuri cultivado sob diferentes níveis de reposição hídrica. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram distribuídos em esquema fatorial 3×3, composto por três estratégias de mitigação do estresse hídrico (silício, hidrogel e a associação silício + hidrogel) e três níveis de reposição hídrica (40%, 60% e 80% da capacidade de campo), acrescido de um tratamento controle mantido a 100% da capacidade de campo. Foram avaliadas variáveis ecofisiológicas, morfogênicas, produtivas e bromatológicas. A restrição hídrica reduziu significativamente ($P<0,05$) o teor relativo de água, a área foliar, os teores de clorofilas, a taxa de aparecimento foliar, a taxa de alongamento foliar e a massa seca total do capim-zuri. Em condições de déficit hídrico severo (40% da capacidade de campo), a associação silício + hidrogel promoveu menor vazamento de eletrólitos e maiores valores de teor relativo de água, clorofila total e área foliar em comparação aos demais tratamentos submetidos à mesma condição hídrica. A combinação dos mitigadores também favoreceu a manutenção do número de folhas vivas, da taxa de alongamento foliar e dos teores de proteína bruta. A análise de componentes principais explicou 79,5% da variabilidade total dos dados, agrupando os tratamentos conforme suas respostas ao déficit hídrico. Os tratamentos controle e aqueles submetidos a maior disponibilidade hídrica (60% e 80% da capacidade de campo) associaram-se a maiores taxas de crescimento, massa seca, área foliar e teor relativo de água, enquanto os tratamentos sob 40% da capacidade de campo foram caracterizados por maiores valores de vazamento de eletrólitos e senescência foliar. A associação entre silício e hidrogel constitui uma estratégia eficiente para atenuar os efeitos do déficit hídrico sobre o crescimento e a qualidade do capim-zuri.

Palavras-chave: condicionadores de solo; ecofisiologia; forragem tropical; retenção hídrica.

1 INTRODUÇÃO

A produção de forragem em regiões tropicais é limitada pela distribuição irregular das chuvas, o que torna o déficit hídrico um dos principais estresses abióticos a comprometer a produtividade e a qualidade das pastagens (Chaves *et al.,* 2003). Em gramíneas forrageiras, a baixa disponibilidade de água no solo induz o fechamento estomático mediado por ácido abscísico, reduz a expansão foliar e promove acúmulo de espécies reativas de oxigênio, o que resulta em fotoinibição, degradação de pigmentos fotossintéticos e peroxidação de lipídios de membrana (Taiz *et al.,* 2017; Foyer; Noctor, 2005). Como consequência, observa-se senescência acelerada de folhas e perfilhos, elevação dos teores de fibra em detergente ácido e lignina, e redução da proteína bruta e da digestibilidade da forragem, com impacto direto no desempenho animal (Paciullo *et al.,* 2001). Nesse contexto, estratégias de manejo que atenuem os efeitos do déficit hídrico são essenciais para a sustentabilidade dos sistemas pastoris.

A cultivar BRS Zuri (*Panicum maximum)* é uma das forrageiras tropicais de maior expressão econômica, destacando-se pela alta produtividade de 21,8 toneladas de matéria seca por ano (EMBRAPA; UNIPASTO, 2014), porte elevado e boa relação folha/colmo, com teores de proteína bruta que podem superar 12% nas lâminas foliares sob condições adequadas de manejo (Rodrigues et al., 2026; Jank *et al.,* 2017). Contudo, sua produtividade é significativamente reduzida quando a umidade do solo se aproxima de níveis críticos, especialmente em solos de textura arenosa e baixa capacidade de retenção de água, características comuns nos cerrados brasileiros (Gomide *et al.,* 2019). A sensibilidade da cultivar ao estresse hídrico justifica a investigação de tecnologias que ampliem a disponibilidade de água no substrato ou que confiram maior tolerância fisiológica à planta (Melo *et al.,* 2025).

O uso de polímeros superabsorventes, os chamados hidrogéis, constitui uma estratégia física para aumentar a capacidade de retenção de água no solo. Esses materiais, geralmente à base de poliacrilato de potássio, absorvem grandes volumes de água e a liberam gradualmente conforme o potencial matricial do solo diminui, prolongando a disponibilidade hídrica para as plantas (Ahmed, 2015; Prevedello & Balena, 2000). Em gramíneas, a incorporação de hidrogel ao substrato tem sido associada à manutenção da área foliar e à redução dos sintomas de murcha durante períodos de estiagem moderada (Liu *et al.,* 2022). Paralelamente, o silício (Si), embora não seja considerado elemento essencial, atua como indutor de resiliência fisiológica. Sua deposição como sílica amorfa na parede celular e no apoplasto reduz a transpiração cuticular,

enquanto a ativação de enzimas antioxidantes mediada pelo Si minimiza o extravasamento de eletrólitos e a peroxidação lipídica, preservando a integridade das membranas sob déficit hídrico (Epstein, 1999; Debona *et al.,* 2017; Coskun *et al.,* 2019). Ademais, trabalhos com gramíneas forrageiras indicam que a adubação silicatada pode modular positivamente a composição bromatológica, reduzindo os constituintes da parede celular e elevando os teores de proteína bruta (Santana et al., 2025; Ponce *et al.,* 2022).

Embora os mecanismos de ação do hidrogel e do silício estejam descritos de forma isolada (Debona *et al.,* 2017; Liu *et al.,* 2022), ainda são escassos os estudos que avaliam seus efeitos em gramíneas tropicais sob diferentes intensidades de déficit hídrico. Nesse contexto, permanece necessário compreender se a maior retenção de água proporcionada pelo hidrogel pode potencializar a ação do silício e como essa interação se reflete em respostas fisiológicas, produtivas e bromatológicas do capim-zuri. A inclusão de um tratamento sem restrição hídrica para permitir uma comparação sobre a eficiência dessas estratégias em aproximar as plantas da condição hídrica ideal, fornecendo informações relevantes para o manejo de pastagens em ambientes sujeitos à escassez de água.

Diante do exposto, testou-se a hipótese de que a associação entre silício e hidrogel é capaz de atenuar os efeitos do déficit hídrico sobre o crescimento, a produção de forragem e a composição química do capim-zuri. Assim o objetivo foi avaliar a eficiência do silício e do hidrogel aplicados isolados ou em associação na mitigação dos efeitos do déficit hídrico sobre os indicadores fisiológicos, de crescimento e produção e de valor nutritivo do capim-zuri.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação no Setor de Forragicultura e Pastagens do *Campus* Professora Cinobelina Elvas (CPCE) da Universidade Federal do Piauí (UFPI), município de Bom Jesus, Piauí, Brasil. A cidade está situada no sul do estado, microrregião do Alto-Médio Gurguéia, nas coordenadas 09º04'28" S e 44º21'31" O, a 504.51 m de altitude. A classificação climática é do tipo Aw, segundo Köppen (1936), e o clima da região é tropical, com inverno seco (Medeiros *et al.,* 2020).

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na combinação de três estratégias de mitigação do estresse hídrico (silício, hidrogel e silício + hidrogel) e três níveis de reposição hídrica (40%, 60% e 80% da capacidade de campo), em esquema fatorial 3 × 3, acrescido de um tratamento controle mantido a 100% da capacidade de campo. Assim, foram avaliados dez tratamentos em um arranjo fatorial com tratamento adicional.

O solo foi coletado em área experimental da UFPI-CPCE, destorroado, peneirado e submetido à análise química e granulométrica no Laboratório de Solos da UFPI. Com base nos resultados (Tabela 1), procedeu-se às correções e adubações de plantio conforme recomendações específicas para a cultura (Ribeiro; Guimarães e Alvarez, 1999). Cada vaso, com capacidade para 8 L, recebeu um volume de 7 dm^{-3} de solo.

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo coletado.

P	Fe	Zn	pH	Al+H	K	Ca	Mg	m	V
	mg/dm^3				$cmolc\ dm^{-3}$			%	
15,6	56,3	2,2	5,9	1,5	0,24	1,4	0,75	0,0	61,9

---------- Tamanho da partícula (g/kg^{-1}) ----------		
Argila	Silte	Areia
275,0	44,0	682,0

m=saturação por alumínio; V=saturação por bases

A aplicação dos mitigadores de estresse hídrico foi realizada mediante a homogeneização prévia do solo com os respectivos produtos (silício, hidrogel e a combinação silício + hidrogel) em sacos plásticos. A dose de silicato foi estabelecida com base nas recomendações de Santana et al. (2025). consistiu na incorporação de 0,75 g dm^{-3} de silicato de sódio (Na_2SiO_3), que apresentava 25% de SiO_2 e 8% de Na_2O em sua composição, o que corresponde a aproximadamente 11,7% de silício elementar. A dose de hidrogel foi definida de

acordo com as recomendações do fabricante para gramíneas de interesse agrícola, que foi de. 5 mg dm^{-3} de solo. O hidrogel utilizado era composto por carbonato de cálcio, copolímeros de poliacrilamida e acrilatos. Sua composição continha 14% de cálcio e 3% de magnésio, além de apresentar capacidade de retenção de água de 270% e capacidade de troca catiônica de 2000 mmolc kg^{-1}.

A capacidade de campo do solo foi determinada pelo método gravimétrico utilizando a taxa de decréscimo do teor de água (Campbell e Norman, 1998: Casaroli e Van Lier, 2008). Inicialmente, os recipientes foram preenchidos com solo previamente homogeneizado e saturados com água até o início da drenagem pelo fundo dos vasos. Após a saturação, os vasos permaneceram em drenagem livre por 24 h, permitindo a remoção da água gravitacional. Imediatamente após o término da drenagem, os vasos foram pesados novamente para a obtenção da massa do conjunto (solo úmido + vaso) na capacidade de campo (M_{CC}, g). A capacidade de campo expressa em porcentagem de base de massa seca (CC, %) foi calculada de acordo com a Equação 1, em que Msv é a massa de solo seco + o vaso; Mss é a massa do solo seco (solo seco – vaso).

$$CC(\%) = (\frac{M_{CC} - M_{SV}}{M_{SS}}) X100$$

Equação 1

Os tratamentos foram mantidos em 100% CC (controle), 80% da CC (estresse hídrico leve), 60% da CC (estresse hídrico moderado) e 40% da CC (estresse hídrico severo) ao longo durante o experimento. Para tanto, a umidade do solo foi monitorada diariamente por meio da pesagem dos vasos, sendo que a quantidade de água a ser aplicada em cada irrigação (g ou mL) foi determinada pela diferença entre a massa-alvo do tratamento e a massa observada no momento da avaliação. Dessa forma, os tratamentos foram mantidos continuamente em 100% (controle), 80%, 60% e 40% da CC ao longo de todo o experimento, por meio da reposição diária da água consumida por evapotranspiração.

Após o preparo dos vasos e a aplicação dos tratamentos, foram semeadas 30 sementes de *Panicum maximum* cv. BRS Zuri por unidade experimental. Vinte dias após a emergência, realizou-se o desbaste, mantendo-se cinco plantas por vaso. Aos 30 dias após a semeadura, foi efetuada a adubação de cobertura com nitrogênio e potássio, nas doses equivalentes a 50 mg dm^{-3} de N e 30 mg dm^{-3} de K_2O. Nessa mesma ocasião, as plantas foram submetidas a um corte de uniformização a 20 cm de altura em relação ao solo, marcando o início do período experimental e das avaliações das variáveis ecofisiológicas, morfogênicas, produtivas e

bromatológicas. As avaliações foram realizadas semanalmente ao longo de cada ciclo de crescimento, com duração de 30 dias. Ao final de cada ciclo, as plantas foram novamente cortadas a 20 cm de altura para o início de um novo ciclo. Durante o experimento, foram conduzidos três ciclos consecutivos de avaliação, totalizando três cortes experimentais.

Após o corte de uniformização e ao início de cada ciclo avaliativo, foram marcados três perfilhos por vaso para a determinação das características morfogênicas e estruturais. Os perfilhos foram identificados com fios coloridos e avaliados semanalmente com o auxílio de uma régua graduada em centímetros. Foram mensuradas a altura do pseudocolmo, a altura do perfilho estendido e o comprimento de cada folha. Com base nessas medições, foram estimadas as seguintes variáveis: taxa de aparecimento de folhas (TApF; folhas perfilho^{-1} dia^{-1}), filocrono (dias folha^{-1} perfilho^{-1}), taxa de alongamento foliar (TAlF; cm perfilho^{-1} dia^{-1}), taxa de alongamento do colmo (TAlC; cm perfilho^{-1} dia^{-1}), comprimento final da folha (CFF; cm perfilho^{-1}), taxa de senescência foliar (TSeF; cm perfilho^{-1} dia^{-1}), número de folhas vivas (NFV; folhas perfilho^{-1}) e duração de vida das folhas (DVF; dias), conforme metodologia descrita por Lemaire e Chapman (1996).

As características produtivas do capim-zuri foram avaliadas ao final de cada ciclo. A massa seca total (MST; g vaso^{-1}) foi determinada por meio do corte de toda a forragem presente em cada unidade experimental. As amostras foram pesadas para obtenção da massa verde e, posteriormente, secas em estufa de ventilação forçada de ar a 55 °C por 72 horas. Após a secagem, as amostras foram novamente pesadas para determinação da MST.

Para a avaliação dos componentes morfológicos da forragem, foi retirada uma subamostra representativa do material colhido, a qual foi separada manualmente em lâmina foliar, colmo (colmo + bainha) e material morto. Após a separação, os componentes foram secos em estufa nas mesmas condições descritas anteriormente e pesados para determinação da massa seca de folhas (MSF), massa seca de colmos (MSC) e massa seca de material morto (MSMM), expressas em g vaso^{-1}. A relação folha:colmo (F:C) foi calculada pela razão entre a MSF e a MSC, enquanto a relação material vivo:morto (V:M) foi obtida pela razão entre a soma da MSF e da MSC e a MSMM.

As amostras da MST foram moídas em moinho tipo Willey, utilizando peneira de 1 mm, e encaminhadas ao Laboratório de Nutrição Animal do CPCE/UFPI para determinação dos teores de matéria mineral (MM) e proteína bruta (PB), conforme metodologias descritas pela AOAC (2000), utilizando os métodos nº 930.15 e 976.05, respectivamente. Os teores de fibra

em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA) foram determinados segundo a metodologia proposta por Van Soest *et al*. (1991).

A determinação dos pigmentos fotossintéticos (clorofilas *a*, *b* e *total* e de carotenóides) foi realizada conforme a metodologia descrita por Wellburn (1994), onde foi realizado o preparo da solução de dimetilsulfóxido (DMSO) e o revestimento dos tubos de ensaio com papel alumínio. Após a extração dos discos, estes foram transferidos para os tubos contendo a solução (DMSO). Após esse procedimento, os tubos foram fechados com papel alumínio e mantidos em um local por 48 h sem luz a temperatura ambiente. Ao final, os tubos com os discos ficaram em banho maria a 65 °C, por 1,0 h. Posteriormente, foram retirados até atingirem a temperatura ambiente, a mistura foi lida em espectrofotômetro a 480, 649 e 665 nm. Após a leitura os teores de clorofilas *a, b e total* e de carotenóides foram determinados de acordo com as seguintes equações:

$$\text{(1) Clorofila } a \text{ (Clf } a\text{)} = 12{,}47_{A665} - 3{,}62_{A649};$$

$$\text{(2) Clorofila } b \text{ (Clf } b\text{)} = 25{,}06_{A649} - 6{,}50_{A665};$$

$$\text{(3) Clorofila } total \text{ (a+b)} = 7{,}15_{A665} + 18{,}71_{A649};$$

$$\text{(4) Carotenoides} = (1000_{A480} - 1{,}29 \text{ Clf } a - 53{,}78 \text{ Clf } b) /220.$$

A determinação da área foliar (AF) foi realizada por meio do integrador de área foliar de bancada LI-3100C (LICOR), com uma resolução de 1 mm². O teor relativo de água (TRA) e a suculência foliar (SF) foram determinados para estimar o status hídrico da planta, conforme a metodologia de Catsky (1960). Foram utilizados dez discos foliares com 1,0 cm de diâmetro, em que a massa fresca dos discos (MF) foi aferida por meio da pesagem em balança analítica, após, foram colocados em água destilada, por três horas, até que atinjam a turgidez máxima.

Em seguida, foi realizada a pesagem dos discos novamente para estimar a turgidez máxima (MT), o material foi transferido para estufa a 60 °C, por 72 h, para secagem. Ao final deste período, as amostras foram pesadas para obtenção da massa seca (MS). Os cálculos foram obtidos utilizando a seguinte equação:

$$\text{TRA (\%)} = [(\text{MF-MS}) / (\text{MT-MS})] \text{ x } 100.$$

A suculência foliar (SF) foi obtida utilizando os dados de massa fresca e seca das folhas e área foliar, conforme a seguinte equação proposta por Mantovani (1999):

$$LS\ (g\ H_2O\ m^{-2}) = (PAFM - PADM) / AF.$$

Em que: PAFM = massa fresca da parte aérea; PADM = massa seca da parte aérea; AF = área foliar.

Para o vazamento de eletrólitos, foram retiradas amostras de 100 mg de discos foliares de 1 cm de diâmetro. Estes foram imersos em 10 ml de água deionizada em tubos de ensaio, estes tubos foram vedados com tampas plásticas e ficaram em banho-maria a 32 °C por 2h, após a condutividade elétrica inicial (EC1) foi aferida usando um medidor de condutividade elétrica (CM-115, Kyoto Electronics, Kyoto, Japão). Estas amostras foram postas em banho maria a 100 °C, por 30 min, para finalizar a liberação dos eletrólitos e foi realizada a leitura da condutividade elétrica final com as amostras já resfriadas (EC2) (Dionísio-Sese & Tobita, 1998). Por fim o vazamento de eletrólito (EL) foi calculado pela seguinte equação:

$$EL = EC\ 1\ /EC\ 2 \times 100.$$

Os dados foram avaliados quanto à sua normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, homogeneidade de variância pelo teste de Bartlett, independência dos erros por análise gráfica dos resíduos e após cumpridos esses requisitos submetidos à análise de variância. As médias dentro do fatorial foram comparadas pelo teste de skott-knott a um nível de 5% de probabilidade ($p<0,05$) (Borges, Ferreira, 2003). Para avaliar o contraste entre a testemunha e as combinações do esquema fatorial, aplicou-se o teste de Dunnett a um nível de 5% de probabilidade ($p<0,05$).

Para relacionar a variação das características de crescimento, produção de forragem e composição química do capim-zuri em cada tratamento e as variáveis, foi realizada uma análise de componentes principais (ACP). Isso permitiu caracterizar as variáveis que mais discriminaram os tratamentos, assim o conjunto inicial de variáveis passou a ser caracterizado por duas novas variáveis latentes ortogonais, o que possibilitou a sua localização em figuras bidimensionais (Hair Junior *et al*., 2009).

Para a ACP, em razão das variáveis apresentarem medidas em unidades muito diferentes entre si, antes de aglomerar as amostras, os dados foram padronizados segundo Cao *et al*. (1999).

$$x_i = \frac{yi - Yi}{DPi}$$

Onde:

xi é a variável *i* transformada;

yi é o valor da variável *i* (tratamento) antes da transformação;

Yi é a média da variável *i*;

Dpi é o desvio padrão para variável *i* em todos os cenários em estudo.

As análises estatísticas, confecção de gráficos e demais análises de dados foram realizadas com auxílio do software R versão 4.6.0 (R Core Team, 2026).

3 RESULTADOS

A avaliação dos pressupostos estatísticos indicou que, para a maioria das variáveis, os resíduos apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett. Contudo, a variável matéria mineral (MM) não atendeu ao pressuposto de normalidade dos resíduos. Essa ocorrência não inviabilizou a análise, uma vez que a homogeneidade de variâncias foi observada, o delineamento experimental foi balanceado e os desvios de normalidade em uma variável isolada tendem a exercer menor impacto sobre a validade da ANOVA. Dessa forma, os resultados referentes à MM foram mantidos e interpretados com cautela, considerando essa limitação estatística. Não foi observada interação significativa ($P>0,05$) entre mitigador e estresse hídrico para MM, PB, TApF, TAlF, NFV, TRA, SF, Chl b, Car, MSF, MSMM, MSC, MST e F:MSMM (Tabela 2). Para as demais variáveis, verificou-se interação significativa entre os fatores ($P < 0,05$). Todas as variáveis ecofisiológicas e de composição química apresentaram diferenças entre os tratamentos fatoriais e o controle ($P<0,05$). Entre as variáveis morfogênicas, apenas a TAlF e o NFV não diferiram do controle ($P>0,05$). Da mesma forma, a MSC e a MST não apresentaram diferenças entre os tratamentos fatoriais e o controle ($P > 0,05$).

Tabela 2. Resumo da análise de variância, testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett) para as variáveis de composição química, morfogênese, ecofisiologia e produção do capim-zuri submetido a mitigadores de estresse hídrico e diferentes níveis de disponibilidade hídrica.

Variável [1]	Valores de F [2]					p (Shapiro-Wilk)	p (Bartlett)	CV (%)
	Bloco	Mitigador (MT)	Estresse hídrico (EH)	MT vs EH	Fatorial vs Controle			
Ecofisiológicas								
VE	1,328ns	2,405ns	26,918***	8,218***	335,844***	0,927ns	0,407ns	11,10
TRA	0,666ns	9,459***	10,832***	1,479ns	1648,216***	0,301ns	0,763ns	5,20
SF	1,139ns	0,927ns	32,844***	0,799ns	435,819***	0,422ns	0,280ns	9,30
AF	0,483ns	30,588***	42,743***	3,160*	573,160***	0,489ns	0,100ns	9,00
Chla	1,458ns	8,609**	4,141*	3,139*	411,448***	0,411ns	0,388ns	11,50
Chlb	0,706ns	4,204ns	23,721***	0,808ns	407,001***	0,21ns	0,128ns	11,80
Chlt	1,750ns	5,547**	3,666*	3,331*	592,592***	0,258ns	0,238ns	9,90
Car	0,710ns	2,468*	2,599ns	1,553ns	185,456***	0,652ns	0,113ns	13,80
Morfogênese								
CFF	0,280ns	18,793***	0,143ns	3,027*	2172,876***	0,212ns	0,747ns	7,90
FILOCR	1,052ns	1,145ns	2,124ns	6,405***	505,494***	0,132ns	0,074ns	11,10
TApF	0,564ns	2,873ns	2,047ns	0,630ns	141,691***	0,261ns	0,711ns	20,90
TAlF	2,429ns	1,414ns	3,013ns	0,335ns	170,648ns	0,557ns	0,110ns	18,40
NFV	0,634ns	0,597ns	2,821*	1,907ns	318,854ns	0,987ns	0,393ns	12,30
TSeF	0,365ns	0,844ns	20,415***	2,719*	7,575*	0,424ns	0,618ns	19,10

DVF	0,787ns	8,949**	7,521**	8,409***	562,272***	0,42ns	0,514ns	9,90
TAIC	0,097ns	8,915**	4,092*	0,804*	73,985***	0,606ns	0,620ns	48,40
Produção								
MSF	1,266ns	0,387ns	7,880**	1,625ns	1181,656***	0,163ns	0,356ns	6,40
MSMM	1,583ns	1,071ns	5,119*	0,649ns	149,402***	0,706ns	0,861ns	12,10
MSC	1,335ns	0,467ns	0,362*	1,947ns	85,169ns	0,063ns	0,266ns	20,00
MST	0,865ns	0,572ns	0,508*	1,748ns	704,883ns	0,897ns	0,344ns	6,70
F:C	2,239ns	0,882ns	1,333*	3,676*	92,173***	0,059ns	0,073ns	21,40
F:MSMM	2,110ns	0,268ns	10,720***	0,293ns	506,825***	0,369ns	0,916ns	13,80
Composição química								
MM	0,603ns	0,184ns	0,262*	0,531ns	148,132***	0,033*	0,059ns	13,00
PB	0,625ns	1,020*	4,387*	1,052ns	172,779***	0,413ns	0,078ns	15,30
FDN	1,113ns	0,186ns	2,884ns	0,908*	7526,305***	0,21ns	0,059ns	10,80
FDA	1,066ns	0,899ns	1,454ns	3,396*	404,812***	0,119ns	0,100ns	10,00

(1) Variáveis: Vazamento de eletrólitos (VE), Teor relativo de água (TRA), Suculência foliar (SF), Área foliar (AF), Clorofila a (Chl a), Clorofila b (Chl b), Clorofila total (Chl t), Carotenoides (Car), Matéria mineral (MM), Proteína bruta (PB), Fibra em detergente neutro (FDN), Fibra em detergente ácido (FDA), Comprimento final da folha (CFF), Filocrono (FILOCR), Taxa de aparecimento de folha (TApF), Taxa de alongamento da folha (TAlF), Número de folhas vivas (NFV), Taxa de senescência (TSeF), Duração de vida da folha (DVF), Taxa de alongamento de colmo (TAIC), Massa seca da folha (MSF), Massa seca do material morto (MSMM), Massa seca do colmo (MSC), Massa seca total (MST), Relação folha/colmo (F:C), Relação folha/material morto (F:MSMM). (2) ns, não significativo; * significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$); ** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); *** significativo a 0,1% de probabilidade ($p < 0,001$).

Para o vazamento de eletrólitos, sob 40% da CC, a aplicação conjunta de silício e hidrogel promoveu os menores valores, enquanto os maiores ocorreram com a aplicação isolada desses mitigadores (Figura 1). Em 60% CC, a combinação silício + hidrogel resultou no maior vazamento, o hidrogel isolado apresentou os menores valores. Sob 80% CC, o maior vazamento foi observado nas plantas tratadas apenas com hidrogel. Em comparação ao controle, apenas os tratamentos com hidrogel ou silício isolados sob 40% CC apresentaram maior vazamento de eletrólitos, enquanto a combinação silício + hidrogel sob 80% CC provocou menor vazamento de eletrólitos.

O teor relativo de água foi pouco influenciado pelos mitigadores, exceto sob 40% CC, condição em que o hidrogel isolado apresentou os menores valores, enquanto o silício isolado e sua combinação com hidrogel promoveram os maiores teores. Apenas o tratamento com hidrogel sob 40% CC diferiu negativamente do controle.

A suculência foliar e a área foliar foram influenciadas principalmente pela disponibilidade hídrica, com menores valores sob 40% da CC e aumento progressivo nas condições de 60 e 80% da CC (Figura 1). Para a área foliar, o silício isolado apresentou maior destaque entre os mitigadores, especialmente nas condições de maior disponibilidade de água. A suculência foliar, por sua vez, apresentou resposta mais evidente em 60% da CC, condição em que os tratamentos com hidrogel e silício isolados promoveram maiores valores. Em comparação ao controle, os incrementos mais expressivos para essas variáveis ocorreram sob 60% da CC, indicando que a atuação dos mitigadores foi mais perceptível em condição de déficit hídrico moderado.

Os pigmentos fotossintéticos apresentaram respostas semelhantes. Para clorofila a e clorofila total, a combinação silício + hidrogel promoveu os maiores valores sob 40% CC, enquanto o hidrogel isolado destacou-se sob 80% CC. Em contrapartida, o silício isolado apresentou os menores teores em 60% CC para ambas as variáveis. Comparativamente ao controle, apenas o hidrogel sob 80% CC aumentou os teores de clorofila a e clorofila total.

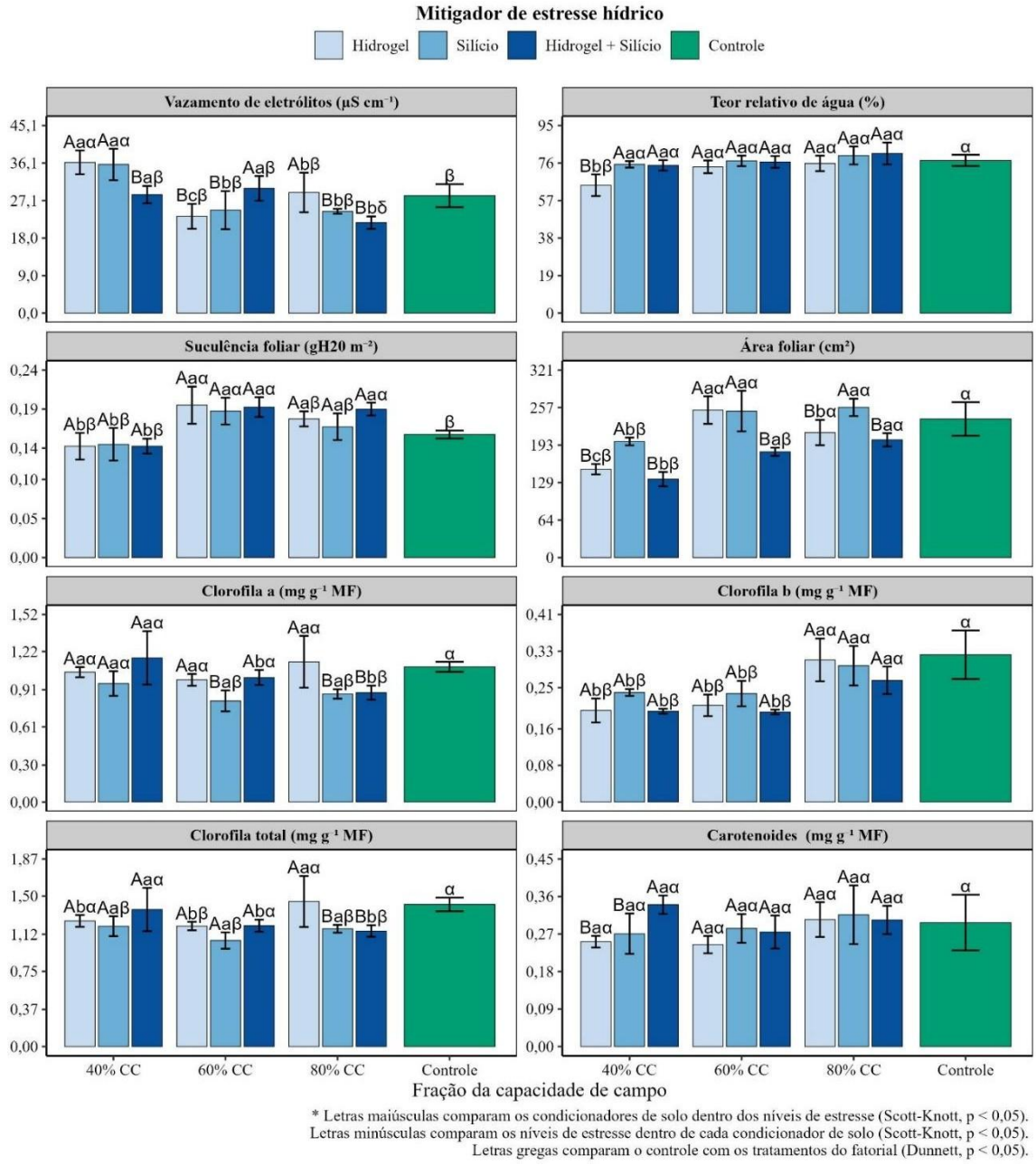


Figura 1. Características ecofisiológicas do capim-zuri sob diferentes condições hídricas e estratégias de mitigação do estresse hídrico.

Para clorofila *b* e carotenoides, os maiores teores foram observados nas condições de maior disponibilidade hídrica, especialmente nos tratamentos com hidrogel ou silício aplicados isoladamente. Sob 40% da CC, a combinação silício + hidrogel promoveu os maiores teores de carotenoides, enquanto o silício isolado se destacou para clorofila *b* nas condições de 40 e 60% da CC. Em relação ao controle, as diferenças significativas foram mais evidentes para os carotenoides sob 40% da CC e para alguns tratamentos que

apresentaram menores teores de clorofila *b*, indicando que a resposta dos pigmentos variou conforme o tipo de mitigador e a intensidade do déficit hídrico.

Para o comprimento final da folha (CFF) e o número de folhas vivas (NFV), as diferenças entre os mitigadores ocorreram apenas em condições hídricas específicas. O hidrogel favoreceu maiores valores de CFF em 60 e 80% da CC, enquanto o silício isolado resultou em menor NFV em 60% da CC. Apesar dessas variações pontuais entre os mitigadores, ambas as variáveis apresentaram valores semelhantes aos do controle, indicando manutenção parcial da estrutura foliar do capim-zuri sob restrição hídrica. A taxa de aparecimento foliar (TApF) foi maior com a combinação silício + hidrogel em 40 e 60% da CC, enquanto em 80% da CC não houve diferenças entre os mitigadores. Dentro de cada mitigador, a TApF não variou entre as condições hídricas e todos os tratamentos apresentaram valores semelhantes ao controle (Figura 2).

Para o filocrono, as diferenças entre mitigadores foram observadas em 60 e 80% da CC. Em 60% da CC, o menor valor foi registrado com o silício isolado, enquanto em 80% da CC a combinação silício + hidrogel apresentou o menor filocrono. Dentro dos mitigadores, apenas a combinação silício + hidrogel apresentou redução do filocrono com o aumento da disponibilidade hídrica. Em comparação ao controle, somente a combinação silício + hidrogel em 80% da CC apresentou valor inferior, sugerindo maior velocidade de emissão foliar nessa condição.

A taxa de senescência foliar (TSeF) e a duração de vida das folhas (DVF) apresentaram respostas contrastantes. A TSeF reduziu com o aumento da disponibilidade hídrica, evidenciando maior senescência sob déficit mais intenso. A DVF, por sua vez, apresentou menores valores nos tratamentos com silício em 40 e 60% da CC e na combinação silício + hidrogel em 80% da CC. Em comparação ao controle, todos os tratamentos apresentaram maior TSeF, enquanto reduções na DVF foram observadas apenas para o silício em 40 e 60% da CC e para a combinação silício + hidrogel em 80% da CC.

Para a taxa de alongamento do colmo (TAlC), as diferenças entre mitigadores ocorreram nas condições de 40 e 80% da CC. Sob 40% da CC, o silício apresentou os menores valores, enquanto em 80% da CC o hidrogel promoveu os maiores valores. Dentro dos mitigadores, apenas o hidrogel apresentou aumento da TAlC com a elevação da disponibilidade hídrica. De modo geral, os tratamentos apresentaram valores

semelhantes ou inferiores ao controle, indicando que a restrição hídrica e os mitigadores exerceram efeito limitado sobre o alongamento do colmo (Figura 2).

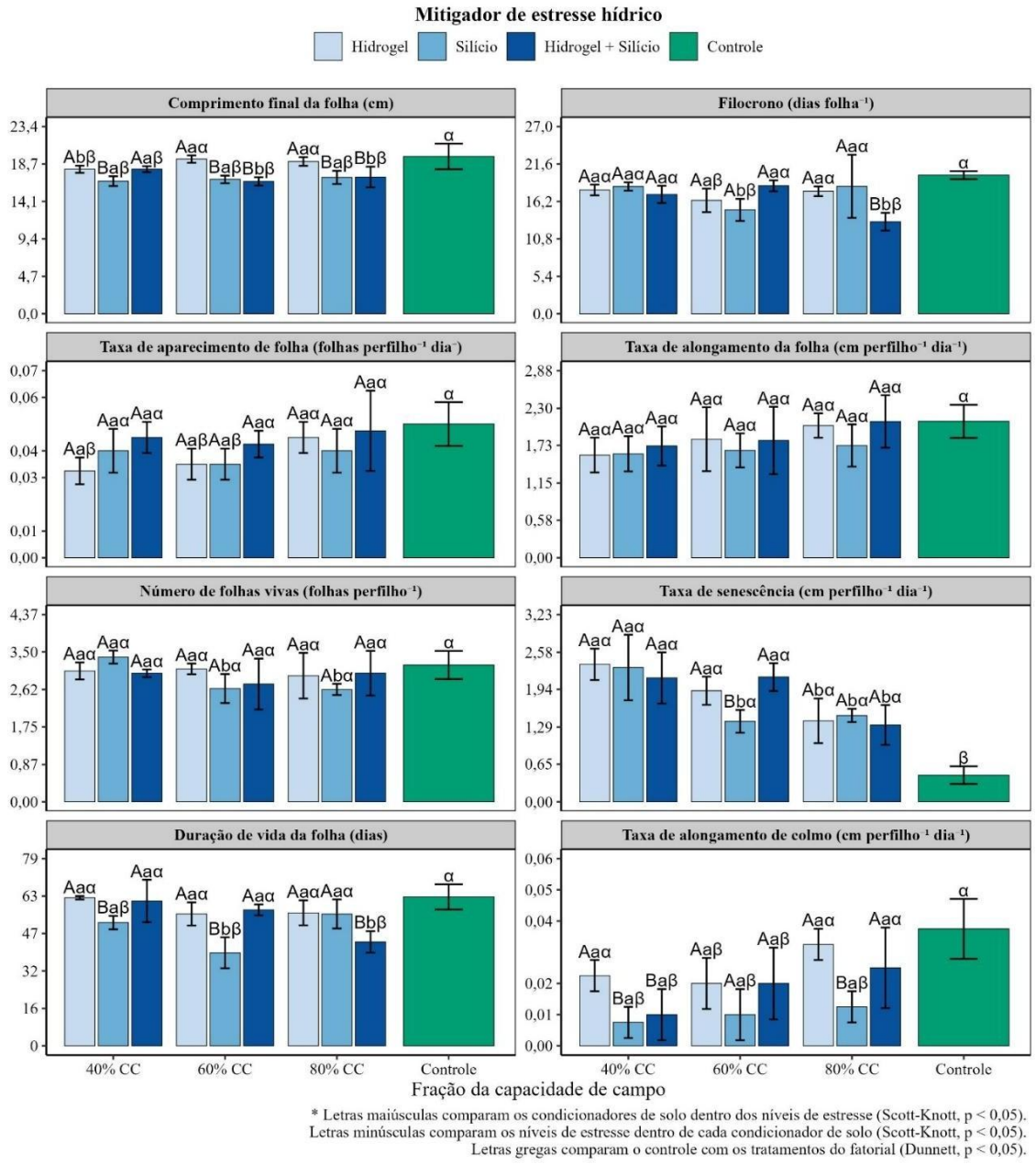


Figura 2. Características morfogênicas e estruturais do capim-zuri sob diferentes condições hídricas e estratégias de mitigação do estresse hídrico.

Para a MSF, diferenças entre mitigadores foram observadas apenas em 60% CC, quando o silício apresentou maior valor que os demais tratamentos. Quando avaliadas as respostas de cada mitigador nos níveis de estresse hídrico, verificou-se aumento da MSF com a elevação da disponibilidade hídrica para hidrogel, silício e combinação silício +

hidrogel. Em comparação ao controle, diferenças foram observadas apenas em 40% CC, quando os tratamentos apresentaram menores valores (Figura 3).

A MSC e a MST apresentaram comportamento semelhante. Diferenças entre mitigadores foram observadas apenas em 60% CC, com maior MST para o silício e menor para o hidrogel e a combinação silício + hidrogel, enquanto a massa seca do colmo não diferiu entre mitigadores. Dentro de cada mitigador, não foram observadas diferenças entre as condições hídricas. Ambas as variáveis apresentaram valores semelhantes ao controle (Figura 3).

Para a MSMM, não houve diferenças entre mitigadores dentro de cada condição hídrica. Entretanto, os valores reduziram com o aumento da disponibilidade hídrica, principalmente para o hidrogel e para a combinação silício + hidrogel. Em comparação ao controle, todos os tratamentos apresentaram maior massa seca de material morto.

A relação F:C diferiu entre mitigadores apenas em 80% CC, com maior valor para o hidrogel. A combinação silício + hidrogel apresentou maior relação F:C em 60% CC e menor em 80% CC. Os tratamentos não diferiram do controle. Para a relação V:M, não foram observadas diferenças entre mitigadores dentro de cada condição hídrica. Contudo, os valores aumentaram com a disponibilidade hídrica para todos os tratamentos. Em comparação ao controle, todos os tratamentos apresentaram menor relação V:M (Figura 3).

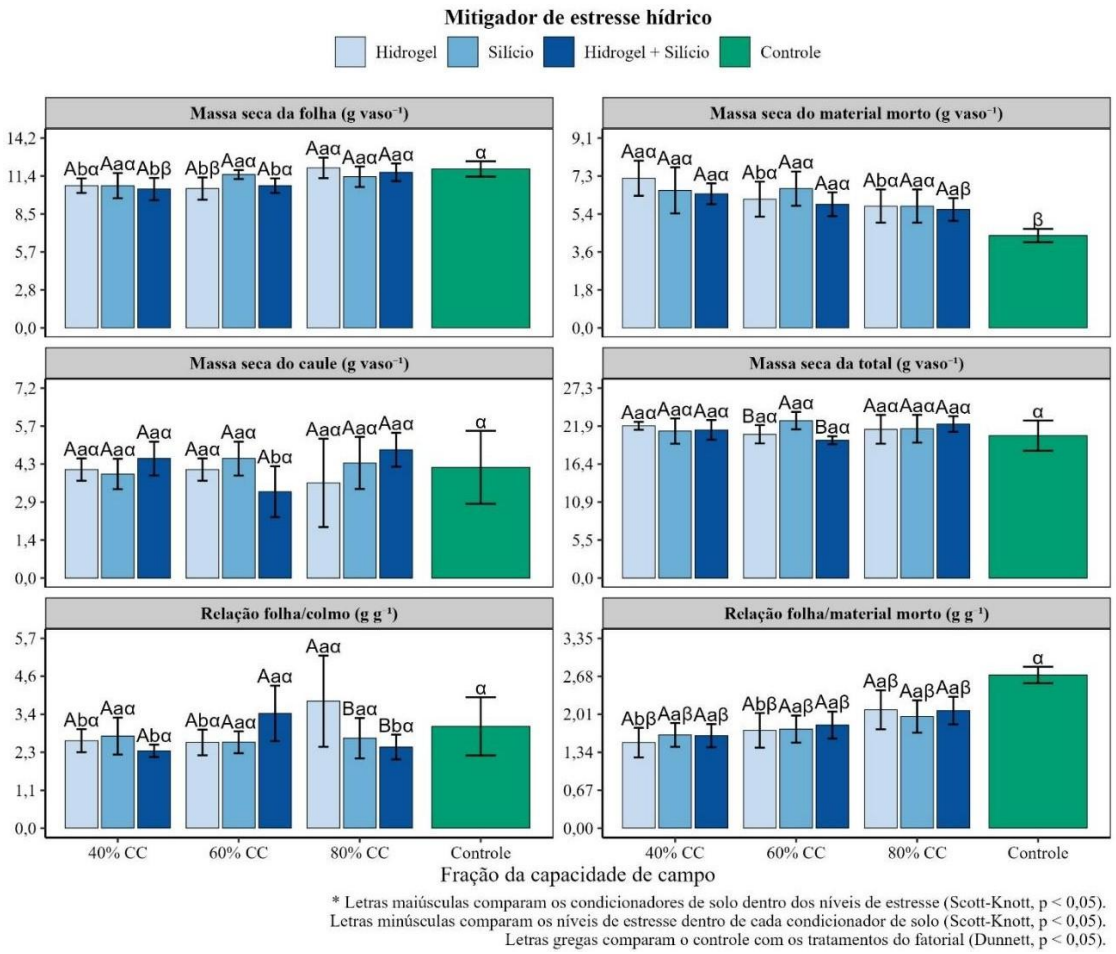


Figura 3. Características produtivas do capim-zuri sob diferentes condições hídricas e estratégias de mitigação do estresse hídrico.

Para a MM (40 e 80%) e a FDA (60%), diferenças entre mitigadores foram observadas apenas em 60% da CC (Figura 4). Nessa condição, o silício promoveu maiores teores de MM e FDA em comparação aos demais tratamentos. Em 40 e 80% CC não foram observadas diferenças entre mitigadores. Dentro de cada mitigador, a MM apresentou maiores valores em 60% CC para o silício e para a combinação silício + hidrogel, enquanto a FDA apresentou maiores valores em 60% CC apenas para o silício. Em comparação ao controle, não foram observadas diferenças para matéria mineral ou FDA.

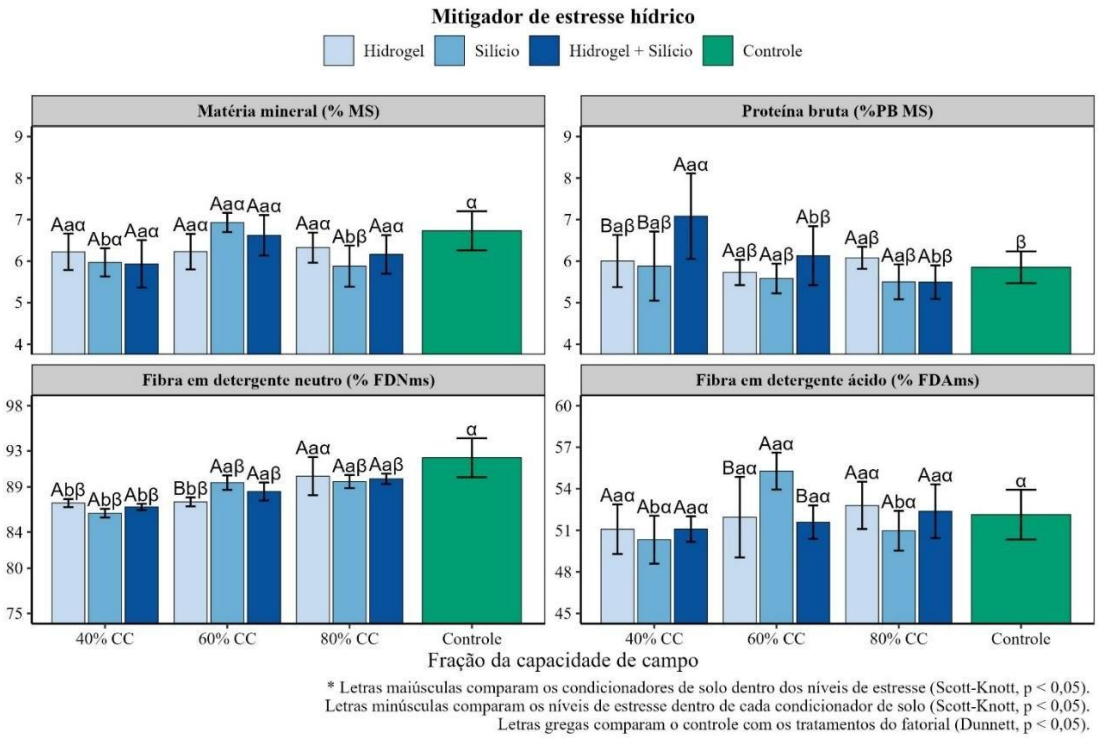


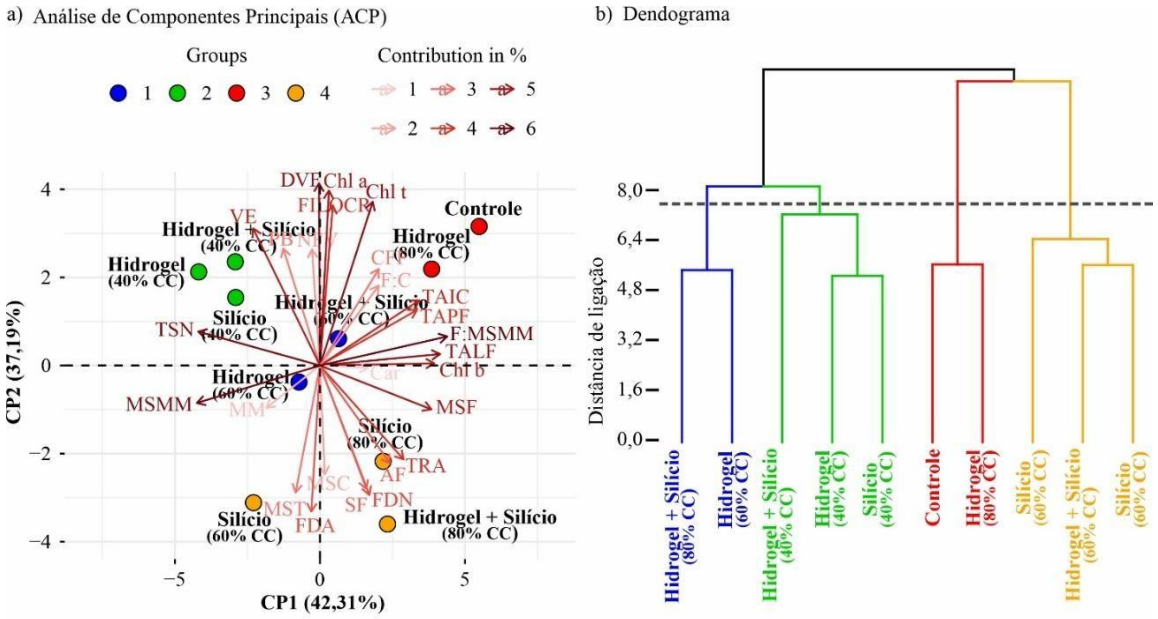
Figura 4. Composição química do capim-zuri sob diferentes condições hídricas e estratégias de mitigação do estresse hídrico.

Para a PB, a combinação silício + hidrogel apresentou os maiores valores em 40 e 60% CC, enquanto em 80% CC não houve diferenças entre mitigadores. Dentro de cada mitigador, não foram observadas diferenças entre as condições hídricas avaliadas. Em comparação ao controle, a combinação silício + hidrogel em 40% CC apresentou maior teor de PB, enquanto os demais tratamentos apresentaram valores semelhantes ao controle.

A FDN apresentou comportamento semelhante entre os mitigadores em 40 e 80% CC. Em 60% CC, o silício promoveu maior teor de FDN em comparação ao hidrogel. Dentro de cada mitigador, observou-se aumento dos valores em 60 e 80% CC em relação a 40% CC para o hidrogel e o silício, enquanto a combinação silício + hidrogel não apresentou diferenças entre as condições hídricas. Em comparação ao controle, os tratamentos submetidos a 40% CC apresentaram menores teores de FDN, enquanto os demais tratamentos apresentaram valores semelhantes ao controle.

A ACP explicou 79,50% da variabilidade total dos dados, sendo 42,31% representada pelo CP1 e 37,19% pelo CP2 (Figura 5a). A distribuição dos tratamentos evidenciou a formação de quatro grupos distintos. Os tratamentos controle, hidrogel (80% CC) e hidrogel + silício (60% CC) apresentaram associação positiva com características

morfofisiológicas relacionadas ao crescimento, como taxa de aparecimento e alongamento foliar, alongamento do colmo, massa seca da folha e relação folha/material morto. Em contrapartida, os tratamentos silício (60% CC), silício (80% CC) e hidrogel + silício (80% CC) estiveram mais correlacionados com atributos estruturais e bromatológicos, como área foliar, teor relativo de água, suculência foliar, FDN, FDA e MST. Já os tratamentos submetidos a 40% da capacidade de campo apresentaram maior associação com variáveis relacionadas ao estresse, destacando-se o vazamento de eletrólitos e a taxa de senescência foliar.



Variáveis: Vazamento de eletrólitos (VE), Teor relativo de água (TRA), Suculência foliar (SF), Área foliar (AF), Clorofila a (Chl a), Clorofila b (Chl b), Clorofila total (Chl t), Carotenoides (Car), Matéria mineral (MM), Proteína bruta (PB), Fibra em detergente neutro (FDN), Fibra em detergente ácido (FDA), Comprimento final da folha (CFF), Filocrono (FILOCR), Taxa de aparecimento de folha (TAPF), Taxa de alongamento da folha (TALF), Número de folhas vivas (NFV), Taxa de senescência (TSN), Duração de vida da folha (DVF), Taxa de alongamento de colmo (TAIC), Massa seca da folha (MSF), Massa seca do material morto (MSMM), Massa seca do caule (MSC), Massa seca da total (MST), Relação folha/colmo (F:C), Relação folha/material morto (F:MSMM).

Figura 5. Análise multivariada dos tratamentos por meio da análise de componentes principais ((5a) e do agrupamento hierárquico (5b).

A análise de agrupamento hierárquico (5b)) corroborou os resultados da ACP, formando quatro agrupamentos principais com nível de similaridade próximo à distância de ligação de 7,5 (Figura 5b). Observou-se a proximidade entre os tratamentos hidrogel + silício (80% CC) e hidrogel (60% CC), bem como entre hidrogel + silício (40% CC), hidrogel (40% CC) e silício (40% CC). O tratamento Controle agrupou-se com hidrogel (80% CC), enquanto os tratamentos Silício (60% CC), hidrogel + silício (60% CC) e silício (80% CC) constituíram um grupo distinto.

4 DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que a aplicação de silício e hidrogel, de forma isolada ou combinada, modifica mecanismos associados à resposta do capim-zuri à restrição hídrica, embora a magnitude desses efeitos dependa da disponibilidade de água no solo. O déficit hídrico promove alterações fisiológicas e estruturais que comprometem o crescimento e a produtividade das forrageiras tropicais (Santana *et al*., 2025). As principais respostas foram observadas em parâmetros relacionados à integridade celular, ao estado hídrico e aos pigmentos fotossintéticos, com maior distinção entre os tratamentos sob déficit hídrico severo (40% da CC). Nessa condição, a associação entre silício e hidrogel apresentou os efeitos mais favoráveis, enquanto, sob 60 e 80% da CC, as diferenças entre os mitigadores e o tratamento controle foram menos pronunciadas.

Esses resultados podem ser explicados pela ação do silício na proteção das membranas celulares e na manutenção do balanço hídrico das plantas sob restrição de água (Debona *et al*., 2017; Frazão *et al*., 2020; Zexer *et al*., 2023). A redução do vazamento de eletrólitos observada nos tratamentos com silício, especialmente quando associado ao hidrogel sob 40% da CC, indica maior estabilidade das membranas, possivelmente decorrente da menor peroxidação lipídica e da ativação do sistema antioxidante, com aumento da atividade de enzimas como superóxido dismutase e catalase (Shi *et al*., 2016; Debona *et al*., 2017). Além disso, o silício pode favorecer o ajuste osmótico e a absorção de nutrientes, particularmente potássio, contribuindo para a manutenção do teor relativo de água, da suculência foliar e da área foliar (Rizwan *et al*., 2015). Assim, a melhor resposta da combinação silício + hidrogel sob déficit hídrico severo sugere que o hidrogel ampliou a disponibilidade de água no solo, enquanto o silício fortaleceu os mecanismos fisiológicos de tolerância, resultando na preservação da integridade celular, do estado hídrico e dos pigmentos fotossintéticos do capim-zuri.

A preservação dos pigmentos fotossintéticos observada neste estudo também pode estar relacionada à redução do estresse oxidativo e à maior eficiência na utilização da água, mecanismos que favorecem a manutenção da atividade fotossintética durante períodos de baixa disponibilidade hídrica (Song *et al*., 2014). Adicionalmente, evidências indicam que o silício pode regular a síntese de solutos compatíveis, fitormônios e a expressão de genes relacionados ao transporte de água e à defesa antioxidante, ampliando a capacidade das plantas de tolerar condições de estresse hídrico (Rizwan *et al*., 2015).

De forma complementar, a ação do hidrogel ajuda a justificar a melhor resposta observada quando esse polímero foi associado ao silício, principalmente sob 40% da CC. Por apresentar elevada capacidade de absorção e retenção de água, o hidrogel atua como reservatório temporário no solo, liberando água gradualmente à medida que ocorre a redução do potencial hídrico da rizosfera (Feng *et al*., 2014; Saha *et al*., 2020). Esse fornecimento mais gradual de água pode ter contribuído para a manutenção do teor relativo de água, da suculência foliar e da área foliar, reduzindo os efeitos imediatos da restrição hídrica sobre o crescimento do capim-zuri. Quando associado ao silício, esse efeito físico do hidrogel provavelmente favoreceu a atuação dos mecanismos fisiológicos de tolerância induzidos pelo Si, como a proteção das membranas celulares, a redução do estresse oxidativo e a preservação dos pigmentos fotossintéticos. Assim, os menores valores de vazamento de eletrólitos e os maiores teores de clorofilas observados na combinação silício + hidrogel sob déficit hídrico severo podem ser atribuídos à atuação conjunta desses mitigadores: o hidrogel ampliando a disponibilidade de água no solo e o silício fortalecendo a integridade celular e o metabolismo antioxidante das plantas.

As alterações ecofisiológicas observadas refletiram-se na dinâmica de emissão, crescimento e renovação dos tecidos do capim-zuri ao longo do seu desenvolvimento. A TAlF manteve-se semelhante à do tratamento controle, independentemente dos tratamentos avaliados, enquanto a associação entre silício e hidrogel preservou a TApF em níveis comparáveis aos observados na condição sem estresse. De modo semelhante, os mitigadores contribuíram para a manutenção do NFV e da DVF, apresentando, na maioria das condições avaliadas, comportamento semelhante ao controle. Além disso, a aplicação de hidrogel, isoladamente ou em associação com o silício, manteve a TAlC e o CFF próximos aos observados em plantas cultivadas sem restrição hídrica. Esses resultados reforçam a estreita relação entre o desempenho ecofisiológico e a expressão das características morfogênicas em gramíneas forrageiras, indicando que a manutenção do estado hídrico e da integridade celular pode favorecer a continuidade dos processos de crescimento sob condições de déficit hídrico.

Entretanto, os mitigadores não foram capazes de reduzir a TSeF. Esse comportamento corrobora os resultados descritos por Santana *et al*. (2025), em que, o silício não alterou significativamente a TSeF. Entretanto, o déficit hídrico aumentou significativamente a TSeF, passando de 0,47 cm dia^{-1} em plantas sem estresse para 1,01 cm dia^{-1} em plantas sob estresse hídrico. Segundo esses autores, a restrição de água compromete processos fisiológicos relacionados à fotossíntese e ao crescimento,

favorecendo a renovação dos tecidos foliares como uma estratégia adaptativa às condições adversas. Da mesma forma, a manutenção da TApF e do NFV observada neste estudo sugere que o capim-zuri apresenta elevada plasticidade morfogênica, ajustando a dinâmica de renovação dos tecidos sem comprometer a estabilidade estrutural dos perfilhos.

De maneira semelhante, Melo *et al*. (2025) verificaram que o capim-zuri aciona mecanismos morfogênicos em resposta ao excesso de nitrogênio, em comparação às condições adequadas de suprimento desse nutriente, aumentando a TApF e TAlF. Em contrapartida, esses ajustes foram acompanhados pela redução da longevidade das folhas e pelo aumento da TSeF, evidenciando a capacidade da espécie em modificar a dinâmica de renovação dos tecidos frente a condições de estresse.

As características produtivas e composição química apresentaram menor sensibilidade aos tratamentos quando comparadas às respostas ecofisiológicas e morfogênicas, indicando que os ajustes fisiológicos e na dinâmica de crescimento antecedem alterações expressivas na produção e na composição da forragem (Gastal e Lemaire, 2015; Rodrigues *et al*., 2026a, Rodrigues *et al*., 2026b). A manutenção da taxa de TApF, do NFV e da TAlF, associada à estabilidade da massa seca de colmo, da massa seca total e da relação folha:colmo, sugere que os mecanismos de adaptação acionados pelo capim-zuri contribuíram para preservar a estrutura produtiva da planta sob déficit hídrico. Não obstante, apesar da manutenção de parte das características produtivas, o aumento da massa seca do material morto e a redução da massa seca foliar em condições de maior restrição hídrica evidenciam que a renovação acelerada dos tecidos observada na morfogênese também se refletiu na alocação de massa de forragem, indicando uma estratégia adaptativa da espécie frente ao estresse.

Os resultados obtidos diferem parcialmente dos relatados por Santana *et al*. (2025), que verificaram que a aplicação isolada de silício apresentou efeito limitado sobre as características produtivas e a composição química do capim-zuri sob déficit hídrico. De forma semelhante, Costa *et al*. (2024) observaram que o hidrogel atua principalmente na melhoria da disponibilidade de água no solo, com reflexos discretos sobre a produção de forragem. Por outro lado, Melo *et al*. (2025) demonstraram que a nanosilíca pode reduzir perdas produtivas e promover alterações pontuais na qualidade da forragem. No presente estudo, a associação entre silício e hidrogel promoveu respostas ecofisiológicas e morfogênicas mais favoráveis, que se refletiram na manutenção de parte dos atributos

produtivos e químicos, sugerindo um efeito complementar desses mitigadores na tolerância ao déficit hídrico.

A ACP revelou que os dois primeiros componentes explicaram 79,50% da variabilidade total dos dados. O CP1 separou os tratamentos associados a melhores respostas fisiológicas e de crescimento, como controle, hidrogel (80% CC) e hidrogel + silício (80% CC), relacionados a maiores teores de clorofilas, TApF e massa seca da folha, daqueles associados a maiores níveis de estresse, como silício (40% CC) e hidrogel (40% CC), que apresentaram maior relação com o vazamento de eletrólitos e a senescência foliar. O tratamento hidrogel + silício (40% CC) ocupou posição intermediária, indicando efeito mitigador da combinação dos aditivos sobre os efeitos da restrição hídrica. Os tratamentos submetidos a 60% da CC também apresentaram distribuição intermediária, sugerindo respostas fisiológicas e produtivas de transição entre as condições de maior e menor disponibilidade hídrica. No CP2, controle, hidrogel (40% CC) e silício (40% CC) estiveram mais associados às variáveis relacionadas aos pigmentos fotossintéticos e à longevidade foliar, enquanto hidrogel + silício (80% CC) e silício (60% CC) apresentaram maior associação com teor relativo de água, área foliar e produção de biomassa, evidenciando maior desenvolvimento estrutural das plantas.

A proximidade entre o tratamento controle e o hidrogel sob 80% da CC sugere que a capacidade de retenção hídrica do polímero foi suficiente para manter um conjunto de respostas semelhante ao observado em condições sem estresse. Em condições de estresse moderado (60% da CC), os tratamentos com silício e hidrogel apresentaram elevada similaridade, indicando que a utilização isolada desses mitigadores pode ser suficiente para reduzir os efeitos da restrição hídrica. Por outro lado, sob déficit hídrico severo (40% da CC), a associação entre silício e hidrogel apresentou um padrão de agrupamento específico, sugerindo uma atuação complementar desses mitigadores na manutenção das respostas ecofisiológicas, morfogênicas e produtivas.

Embora estudos em condições de campo ainda sejam necessários para confirmar a magnitude desses efeitos em sistemas de produção em pasto, os resultados obtidos evidenciam que a combinação destas tecnologias atua simultaneamente para mitigar os impactos do déficit hídrico de maneira mais eficiente do que estratégias isoladas, representando um avanço no manejo sustentável de pastagens tropicais.

5 CONCLUSÃO

O silício e o hidrogel atuam como estratégias complementares na mitigação dos efeitos do déficit hídrico no capim-zuri, pois preservam atributos fisiológicos relacionados ao estado hídrico e à integridade celular. Apesar dos efeitos limitados sobre a produtividade, ambos representam alternativas promissoras para aumentar a resiliência do capim-zuri em ambientes sujeitos à escassez de água.

6 REFERÊNCIAS

AHMED, E. M. Hydrogel: preparation, characterization, and applications: a review. **Journal of Advanced Research**, v. 6, n. 2, p. 105-121, 2015.

AOAC INTERNATIONAL. **Official methods of analysis of AOAC International**. 16. ed. Arlington: AOAC International, 1995.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **Introduction to environmental biophysics**. New York: Springer, 1998.

CAO, Y.; WILLIAMS, D. D.; WILLIAMS, N. E. Data transformation and standardization in the multivariate analysis of river water quality. **Ecological Applications**, Washington, v. 9, n. 2, p. 669–677, 1999.

CASAROLI, D.; VAN LIER, Q. J. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 59-66, 2008.

CATSKÝ, J. Determination of water deficit in disks cut out from leaf blades. **Biologia Plantarum**, v. 2, n. 1, p. 76-78, 1960.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought: from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, v. 30, n. 3, p. 239-264, 2003.

COSKUN, D. *et al*. The controversies of silicon's role in plant biology. **New Phytologist**, v. 221, n. 1, p. 67-85, 2019.

COSTA, P. R. *et al*. Effect of using hydrogel polymers on morphometric, forage production, and nutritional characteristics of cactus pear. **Journal of the Professional Association for Cactus Development**, v. 26, p. 30-42, 2024.

DEBONA, D.; RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. **Annual Review of Phytopathology**, v. 55, p. 85-107, 2017.

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, v. 135, n. 1, p. 1-9, 1998.

EMBRAPA; UNIPASTO. BRS Zuri: produção e resistência para a pecuária. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2014. Folder técnico. Disponível em:<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/989349/brs-zuri-panicum-maximum-brs-zuri-producao-e-resistencia-para-a-pecuaria >. Acesso em: 14 jul. 2026.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 641-664, 1999.

FENG, D. *et al*. Synthesis and swelling behaviors of yeast-g-poly(acrylic acid) superabsorbent co-polymer. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 32, p. 12760-12769, 2014.

FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The Plant Cell**, v. 17, n. 7, p. 1866-1875, 2005.

FRAZÃO, J. J. *et al*. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, p. 12492, 2020.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. Defoliation, shoot plasticity, sward structure and herbage utilization in pasture: review of the underlying ecophysiological processes. **Agriculture**, v. 5, n. 4, p. 1146-1171, 2015.

GOMIDE, C. A. M. *et al*. Productive and morphophysiological responses of *Panicum maximum* Jacq. cv. BRS Zuri to timing and doses of nitrogen application and defoliation intensity. **Grassland Science**, v. 65, n. 2, p. 93-100, 2019.

HAIR JUNIOR, J. F. *et al*. Análise multivariada de dados. 6. ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2009.

JANK, L. *et al*. Novas alternativas de cultivares de forrageiras e melhoramento para a sustentabilidade da pecuária. In: SIMPÓSIO DE ADUBAÇÃO E MANEJO DE

PASTAGENS, 4.; SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO ANIMAL A PASTO, 4., 2017, Dracena. **Sustentabilidade do sistema produtivo**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2017. p. 107-117.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. p. 1-44.

LIU, Y. *et al*. Environmentally friendly hydrogel: a review of classification, preparation and application in agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 846, p. e157303, 2022.

LEMAIRE, G.; CHAPMAN, D. Tissue flows in grazed plant communities. In: HODGSON, J.; ILLIUS, A. W. (eds.). **The ecology and management of grazing systems**. Wallingford: CABI Publishing, 1996. p. 3-29.

MANTOVANI, A. Leaf morpho-physiology and distribution of epiphytic aroids along a vertical gradient in a Brazilian rain forest. **Selbyana**, v. 20, n. 2, p. 241-249, 1999.

MEDEIROS, R. M.; CAVALCANTI, E. P.; DUARTE, J. F. M. Classificação climática de Köppen para o estado do Piauí-Brasil. **Revista Equador**, v. 9, n. 3, p. 82-99, 2020.

MELO, C. C. F. *et al*. Silicon reduces nitrogen stress and improves growth and yield of forage grass under excessive fertilization in tropical soils. **Scientific Reports**, v. 15, p. 24835, 2025.

PACIULLO, D. S. C. *et al*. Composição química e digestibilidade *in vitro* de lâminas foliares e colmos de gramíneas forrageiras, em função do nível de inserção no perfilho, da idade e da estação de crescimento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 3, p. 964-974, 2001.

PONCE, F. da S. *et al*. Adubação silicatada na produtividade e respostas fisiológicas das plantas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e164111637926, 2022.

PREVEDELLO, C. L.; BALENA, S. P. Efeitos de polímeros hidrorretentores nas propriedades físico-hídricas de dois meios porosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 251-258, 2000.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2026.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

RIZWAN, M. *et al*. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 20, p. 15416-15431, 2015.

RODRIGUES, J. G. *et al*. Different grazing frequencies modify the structure, production, and nutritional value of BRS Zuri guineagrass in the Brazilian Cerrado. **Grass and Forage Science**, v. 81, p. e70057, 2026a.

RODRIGUES, J. G. *et al*. Tillering dynamics and morphogenesis in BRS Zuri Guinea grass pastures: responses to grazing management. **Journal of Agricultural Science**, v. 164, p. 1-23, 2026b.

SAHA, A.; SEKHARAN, S.; MANNA, U. Superabsorbent hydrogel (SAH) as a soil amendment for drought management: a review. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. e104736, 2020.

SANTANA, J. C. S. *et al*. Does silicate fertilization associated with different water regimes influence *Panicum maximum* cv. BRS Zuri? **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 56, n. 11, p. 1599-1613, 2025.

SHI, Y. *et al*. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 196, 2016.

SONG, A. *et al*. The effect of silicon on photosynthesis and expression of its relevant genes in rice (*Oryza sativa* L.) under high-zinc stress. **PLoS ONE**, v. 9, n. 11, p. e113782, 2014.

TAIZ, L. *et al*. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science,** v. 74, p. 3583-3597, 1991.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994.

ZEXER, N.; KUMAR, S.; ELBAUM, R. Silica deposition in plants: scaffolding the mineralization. **Annals of Botany**, v. 131, n. 6, p. 897-908, 2023.