

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUBTERRÂNEO MITIGA
PREJUÍZOS DA ESTIAGEM EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS
TROPICAIS**

Danilo Silva Amaral

Engenheiro Agrônomo

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUBTERRÂNEO MITIGA
PREJUÍZOS DA ESTIAGEM EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS
TROPICAIS**

Danilo Silva Amaral

Orientador: Alexandre Barcellos Dalri

Coorientadores: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Prof. Dr. Anderson de Moura Zanine

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das exigências para a
obtenção do título de Doutor em Agronomia
(Ciência do Solo).

2025

A485i

Amaral, Danilo Silva

Irrigação por gotejamento subterrâneo mitiga prejuízos da estiagem em gramíneas forrageiras tropicais / Danilo Silva Amaral. -- Jaboticabal, 2025

90 p. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Alexandre Barcellos Dalri

Coorientador: Renato de Mello Prado

1. *Megathyrsus maximus*. 2. *Urochloa brizantha* x *U. ruziziensis*. 3.

Composição química. 4. Morfogênese. 5. Estresse hídrico. I. Título.

Impactos potencial desta pesquisa

Impulsionar a produção de alimentos de origem animal como leite e carne por minimizar os prejuízos causados pela estiagem na produção de forragem, pelo uso da irrigação por gotejamento, aproveitando melhor os recursos edafoclimáticos disponíveis e fazendo o uso racional da água.

Potential impacts of this research

Boost the production of animal-based foods such as milk and meat by minimizing losses caused by drought in forage production, through the use of drip irrigation, making better use of available soil and climate resources and making rational use of water.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUBTERRÂNEO MITIGA PREJUÍZOS DA ESTIAGEM EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS TROPICAIS

AUTOR: DANILO SILVA AMARAL

ORIENTADOR: ALEXANDRE BARCELLOS DALRI

COORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADOR: ANDERSON DE MOURA ZANINE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE BARCELLOS DALRI**
Data: 14/04/2025 22:45:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **LUIS CESAR DIAS DRUMOND**
Data: 15/04/2025 12:30:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LUÍS CÉSAR DIAS DRUMOND (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Agrárias / Universidade Federal de Viçosa (UFV) - Rio Paranaíba/MG

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FABIANO PALARETTI**
Data: 16/04/2025 10:26:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LUIZ FABIANO PALARETTI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **ALBERTO CARVALHO FILHO**
Data: 18/04/2025 08:52:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ALBERTO CARVALHO FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Agrárias / Universidade Federal de Viçosa (UFV) - Rio Paranaíba/MG

Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 gov.br **ROGERIO TEIXEIRA DE FARIA**
Data: 22/04/2025 14:43:39-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Jaboticabal, 14 de abril de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

DANILO SILVA AMARAL, nascido em Araguari – MG, em 14 de março de 1993, filho de Clodoaldo Barbosa Amaral e Rosangela Silva Amaral. Engenheiro Agrônomo (2017) pela Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Rio Paranaíba, MG. Durante a graduação atuou pesquisas na área de fertirrigação de pastagens sob orientação do Prof. Dr. Luís César Dias Drumond, e em atividades de iniciação à docência como tutor de Bioquímica Fundamental. Obteve título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal) (2019) pela Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Rio Paranaíba, MG, sob orientação do Prof. Dr. André Mundstock Xavier de Carvalho, desenvolvendo sua dissertação sobre irrigação por gotejamento em pastagens na Colômbia. Atuou como pesquisador em projeto de reuso de efluentes na fertirrigação de pastagens. Em 2021 iniciou o curso de Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) na Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” UNESP/ FCAV Jaboticabal – SP sob a orientação do Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri, desenvolvendo pesquisa sobre irrigação de pastagens como estratégias contra o déficit hídrico em forrageiras. Durante o doutorado realizou estágio em docência na área de Hidrologia e Drenagem.

“Do alto de vossas moradas derramais a chuva nas montanhas, do fruto de vossas obras se farta a terra. Fazeis brotar a relva para o gado, e plantas úteis ao homem, para que da terra possa extrair o pão que lhe sustenta as forças” (Sl 103, 13-15).

Aos meus pais Rosangela Silva Amaral
e Clodoaldo Barbosa Amaral

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pela oportunidade de cursar essa pós-graduação e por me conceder perseverança durante esse período. Agradeço à Santíssima Virgem Maria, e a São José, seu castíssimo esposo, por me guiarem nessa caminhada.

Agradeço aos meus pais Clodoaldo e Rosangela, minha irmã Daniela pelo apoio, orientação, convívio, e a todos meus familiares que estiveram torcendo pelo meu êxito acadêmico e profissional. Agradeço aos irmãos da Paróquia Santa Teresa de Jesus pela acolhida na comunidade, especialmente ao Ministério de Música.

Agradeço à minha esposa Cíntia Cármen pelo incentivo, companheirismo, amor e toda a ajuda diante dos desafios de mais essa jornada. Que saibamos viver de tal forma que nossa caminhada seja sempre frutífera.

Deixo meu agradecimento ao PPG em Agronomia (Ciência do Solo) pela oportunidade, a todos os professores que tive durante o curso de doutorado, ao Departamento de Engenharia, aos técnicos e funcionários da Unesp e da FEPE, especialmente Claudia e João. Agradeço aos professores e colegas do grupo de pesquisa GPIMA, especialmente ao professor Luiz Fabiano Palaretti pela solicitude diante das necessidades referentes ao experimento. Agradeço também ao GENPlant pelas parcerias de pesquisa, amizades e aprendizados.

Agradeço ao meu orientador professor Alexandre Barcellos Dalri pelo apoio durante todas as fases do doutorado, especialmente na implantação e condução da pesquisa, pelo convívio, e oportunidades. Estendo minha gratidão aos meus coorientadores, professores Anderson de Moura Zanine e Renato de Mello Prado, pelos aprendizados que me proporcionaram, e pela parceria fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais.....	4
1 Introdução.....	4
2 Revisão bibliográfica.....	5
2.1 Períodos de estiagem: causas, ocorrência e impactos.....	5
2.2 Pastagens: influência da restrição hídrica em espécies de gramíneas tropicais	7
2.2.1 Efeitos da estiagem sobre a nutrição e fisiologia das forrageiras	8
2.2.2 Impactos da estiagem sobre a morfogênese, produção e qualidade da forragem.....	9
2.2 Irrigação e espécies tolerantes: estratégias contra a estiagem	9
3 Referências	10
CAPÍTULO 2 – A irrigação mitiga prejuízos da estiagem em gramíneas forrageiras ao melhorar aspectos nutricionais e produtivos	16
RESUMO.....	16
ABSTRACT	17
1 Introdução.....	18
2 Material e métodos	20
3 Resultados.....	27
4 Discussão	40
5 Conclusões.....	46
6 Referências	47
CAPÍTULO 3 – Mitigando os impactos da estiagem na morfogênese, produção e qualidade da forragem de gramíneas com a irrigação por gotejamento	54
RESUMO.....	54
ABSTRACT	55
1 Introdução.....	56
2 Material e métodos	57
3 Resultados.....	63
4 Discussão	71
5 Conclusões.....	75
6 Referências	76

IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUBTERRÂNEO MITIGA PREJUÍZOS DA ESTIAGEM EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS TROPICAIS

RESUMO – As gramíneas forrageiras são fundamentais para a pecuária brasileira, sendo que grande parte das pastagens no país não tem suprimento hídrico além das chuvas que ocorrem durante as estações da primavera e verão. No entanto, estão sendo cada vez mais frequentes alterações na pluviosidade causando períodos de estiagem. A necessidade de utilizar forrageiras que toleram a estes períodos de déficit hídrico, nesta época do ano, época de maior radiação e temperatura podem levar a perdas da produção de massa de forragem e também na qualidade das forrageiras. Assim esta pesquisa buscou avaliar duas gramíneas forrageiras *Megathyrsus maximus* cv. Zuri e *Urochloa brizantha* x *U. ruziziensis* cv. Mavuno em condição irrigada e sequeiro durante os meses de outubro de 2022 e abril de 2023, formando um experimento em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 2 com quatro blocos. O capim Zuri apresentou maior estabilidade de produção de massa de forragem produzindo 21 t ha⁻¹ de MS em condição de sequeiro apresentando maior acúmulo de aminoácidos (62%), modificações na homeostase C:N:P:Si e manutenção da eficiência de uso de C e nutrientes minerais. O capim Mavuno teve maior responsividade a irrigação produzindo 23 t ha⁻¹ de MS em condição irrigada 41% mais massa de forragem, que a condição em sequeiro (16 t ha⁻¹ de MS), apresentando melhores eficiências de uso de nutrientes, maior o perfilhamento, digestibilidade e energia. A irrigação aumentou a produção de proteína e encurtou o período de rebrota dos pastos com benefícios na composição morfológica e qualidade de ambas as forrageiras.

Palavras-chave: déficit hídrico; pastagens; Mavuno; Zuri

SUBSURFACE DRIP IRRIGATION MITIGATES DROUGHT IMPACTS ON TROPICAL FORAGE GRASSES

ABSTRACT - Forage grasses play a crucial role in Brazilian livestock farming, with most pastures in the country relying on rainfall during the spring and summer seasons. However, changes in precipitation patterns have led to more frequent drought short-term, which negatively affect forage production and quality. This study aimed to evaluate two forage grasses, *Megathyrsus maximus* cv. Zuri and *Urochloa brizantha* x *U. ruziziensis* cv. Mavuno, under irrigated and rainfed conditions from October 2022 to April 2023. A randomized block design in a 2 x 2 factorial scheme with four replications was used. The Zuri grass showed greater stability in forage mass production, yielding 21 t ha⁻¹ of DM under rainfed conditions, with a higher accumulation of amino acids (62%) and maintaining homeostasis of C:N:P:Si, as well as efficiency in the use of C and mineral nutrients. The Mavuno grass had a better response to irrigation, producing 23 t ha⁻¹ of DM under irrigated conditions, 41% more than the rainfed condition (16 t ha⁻¹ of DM), with higher nutrient use efficiency, increased tillering, digestibility, and energy. Irrigation improved protein production and shortened the regrowth period, benefiting the morphological composition and quality of both forages.

Keywords: water deficit; pastures; Mavuno; Zuri

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1 Introdução

Os sistemas de produção animal em pastagens estão presentes em todo o mundo, e remontam ao início da domesticação dos animais pelo ser humano, sendo até hoje um pilar da subsistência de diferentes regiões (Cucchi & Arbuckle, 2021). Essa atividade evoluiu e atualmente figura como uma das mais importantes atividades econômicas no mundo, sendo que o Brasil se destaca por sua produção e exportação de proteína animal (ABIEC, 2024).

A base da pecuária brasileira são os pastos, nos quais são cultivadas diferentes espécies forrageiras, principalmente as gramíneas de clima tropical. A introdução e o melhoramento genético de forrageiras como as dos gêneros *Megathyrsus* e *Urochloa* tornaram as pastagens brasileiras mais produtivas, porém, a estação seca sempre representou um entrave na pecuária devido à baixa produção de forragem causada pelo déficit hídrico (Tejera-Nieves et al., 2023). Isso acontece porque a água influencia o crescimento e o acúmulo de biomassa pelas forrageiras de maneira direta e indireta (Drumond & Aguiar, 2005), resultando em produção sazonal de forragem restrita à época chuvosa, conhecida entre os produtores brasileiros como época das águas.

A necessidade crescente de melhorar a produtividade e otimizar o uso das terras cultivadas com pastagens, tem impulsionado a intensificação desses sistemas, a partir de práticas de manejo do pasto e do pastejo, e implementando a adubação e a irrigação de pastagens (Rocha et al., 2025). A irrigação de pastagens melhora substancialmente a produção de forragem na época seca do ano, com destaque para as regiões que não apresentam queda na temperatura nesse período. No entanto, uma preocupação recente tem sido a má distribuição das chuvas, de forma que mesmo na estação chuvosa pode ocorrer períodos de baixa disponibilidade hídrica no solo, as estiagens.

O estresse hídrico causa o fechamento estomático, diminui a difusão de CO₂ e a redução do fluxo da água com nutrientes pelo xilema afetando a absorção de nutrientes pelas forrageiras (Taiz et al., 2015), diminuindo o acúmulo de massa de forragem. Isso ocorre devido aos impactos na dinâmica de crescimento e expansão

dos tecidos, isto é, os processos morfogênicos das plantas (Marcelino et al., 2006) afetando a qualidade da forragem produzida. No entanto, os impactos das estiagens nesses parâmetros das gramíneas forrageiras, apesar de identificados na prática, ainda não foram elucidados cientificamente. Não se sabe quais as estratégias utilizadas pelas gramíneas para lidar com os períodos de estiagem cada vez mais frequentes em campo. Além disso, os sistemas de irrigação podem ser mais eficientemente utilizados se forem esclarecidos os impactos da restrição hídrica de curto prazo nas pastagens.

Diante do exposto, este estudo buscou elucidar as seguintes questões: i) se a estiagem na época chuvosa prejudica a morfogênese, modificando parâmetros estruturais, produtivos e alterando a qualidade da forragem; ii) se há diferentes respostas das espécies forrageiras *M. maximus* cv Zuri e *U. brizantha* x *U. ruziziensis* cv Mavuno ao estresse hídrico durante a estiagem; iii) se a irrigação por gotejamento pode mitigar os prejuízos da estiagem em diferentes forrageiras. Os objetivos dessa pesquisa foram, portanto, elucidar como os pastos de gramíneas forrageiras respondem à estiagem ocorrida durante o período de chuvas, e qual o potencial de utilização da irrigação por gotejamento em atenuar os possíveis impactos do estresse hídrico. Espera-se contribuir para uma escolha mais assertiva da forrageira a ser utilizada e com uma utilização eficiente da irrigação em pastagens tropicais.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Períodos de estiagem: causas, ocorrência e impactos

Os prejuízos do déficit hídrico em gramíneas forrageiras são um problema recorrente em regiões com clima tropical e subtropical nos quais há uma estação seca definida, que pode ocorrer com diminuição da temperatura do ar e do fotoperíodo em algumas regiões. Esses fatores limitantes causam a escassez de forragem para a alimentação animal, o que se denomina sazonalidade de produção dos pastos, diminuindo a eficiência na produção de proteína animal.

A disponibilidade hídrica está intimamente relacionada a ocorrência de chuvas em volume e distribuição. As irregularidades nas chuvas podem gerar períodos de estresse hídrico mesmo durante as águas, isto é, nas estações da primavera e do

verão no Brasil (Santos et al., 2024). Esse período com alta luminosidade, radiação e temperatura favorável é fundamental para a produção das forrageiras de clima tropical, porém, a restrição hídrica pode comprometer o crescimento dessas plantas. A ocorrência desses eventos tem sido cada vez mais frequentes devido às mudanças climáticas (Sloat et al., 2018; Souza et al., 2020). Estudos indicam a ocorrência e projeções de alterações na pluviosidade e na temperatura na China (Qiu et al., 2023), na Etiópia (Dejene et al., 2023), e também no Brasil (Santos et al., 2024; Marengo et al., 2017).

Reduções na precipitação, juntamente com períodos mais longos com dias secos consecutivos, favorecem a ocorrência de períodos secos, e de estações secas frequentes (Marengo et al., 2017; Nobre et al., 2016; Qiu et al., 2023), que associadas a altas temperaturas elevam a evapotranspiração. Volumes de chuva abaixo da evapotranspiração, ou altos volumes de chuva que superam a velocidade de infiltração básica do solo (VIB), em intervalos longos, não mantêm eficientemente a umidade do solo para as forrageiras.

A infiltração da água no solo depende de vários fatores como textura do solo, declividade, porosidade, estrutura do solo, compactação e da saturação de água no solo, pois, esses fatores definem a condutividade hidráulica do solo e também a VIB. Chuvas ou irrigação acima da VIB do solo geram escoamento superficial da água, ou seja, água que não estará disponível para as plantas. No entanto, nem toda a água que infiltra no solo está disponível para as plantas. A água que está abaixo da profundidade efetiva das raízes também não está disponível as plantas.

A água facilmente disponível (AFD) para as plantas é definida como a umidade volumétrica (Θ) na capacidade de campo (cc) subtraída a Θ no ponto de murcha permanente (pmp) (Bernardo et al., 2019), sendo o resultado multiplicado pela profundidade efetiva das raízes (z) multiplicado por um fator de depleção ou de disponibilidade (f) que é de 0,6 para as forrageiras conforme (FAO, 1998). Abaixo desse ponto de umidade as plantas entram em déficit hídrico.

A restrição hídrica ocorre a partir do momento em que o solo não apresenta disponibilidade de água suficiente para suprir a demanda evapotranspirométrica das plantas. As plantas dependem do fluxo transpiratório para o resfriamento da folha, devido ao alto calor de vaporização da água, aumento do fluxo do xilema, e absorção

de nutrientes. A transpiração ocorre devido a geração de um potencial hídrico (Ψ), que é o principal fator de controle da absorção de água do solo e de sua ascensão à parte aérea, transportando de 200 a 1000 vezes a sua massa seca em água, para assimilação do CO₂ atmosférico, pela fotossíntese, pois, quando a planta abre os estômatos para a aquisição do CO₂, ocorre a perda de água pela transpiração (Taiz et al., 2015). Junto com a água, a planta absorve os nutrientes que possibilitam seu crescimento e conversão do C em biomassa.

2.2 Pastagens: influência da restrição hídrica em espécies de gramíneas tropicais

Estudos relativos ao déficit hídrico em pastagens investigam majoritariamente déficits severos simulando seca, sendo pouco explorados os impactos dos períodos curtos de restrição hídrica na nutrição e produção de gramíneas forrageiras (Cardoso et al., 2015; Guenni et al., 2002). Além disso, há uma lacuna sobre as respostas de diferentes espécies forrageiras à estiagem, e quais mecanismos elas utilizam para tolerar esse estresse. É possível que mudanças na morfogênese provoquem alterações estruturais, na composição e qualidade da forragem (Chand et al., 2022).

As espécies forrageiras diferem entre si quanto à sua tolerância ao déficit hídrico severo. Em estudo de avaliação de respostas das forrageiras a estresse hídrico em condições controladas em casa de vegetação Zuffo et al., (2022), observaram que cultivares de *M. maximus* foram mais tolerantes que as demais forrageiras avaliadas, como os capins *U. brizantha* cv. Piatã, Marandu e Xaraés, *Pennisetum glaucum* e *Paspalum atratum*. Segundo os autores se faz necessário avaliar as forrageiras em condições de campo para confirmar seu potencial de produção de forragem para cultivo em regiões tropicais com ocorrência de estresse hídrico. Além disso, a influência de déficits de curta duração e os mecanismos utilizados pelas espécies forrageiras para lidar com essa condição são pouco conhecidos (Catunda et al., 2022).

A seguir serão abordados os principais fatores potencialmente envolvidos na resposta das gramíneas forrageiras ao déficit hídrico, isto é, a nutrição, a fisiologia, os

processos morfogênicos de crescimento e o acúmulo de biomassa, bem como sua influência na qualidade da forragem.

2.2.1 Efeitos da estiagem sobre a nutrição e fisiologia das forrageiras

A nutrição das plantas é severamente afetada pelo déficit hídrico (Melo et al., 2025), prejudicando a absorção de nutrientes, a ativação de rotas metabólicas secundárias, interferindo na morfologia das folhas, número de folhas, podendo consequentemente afetar a produção de massa das gramíneas forrageiras (Rocha et al., 2022). Os prejuízos causados podem variar conforme a capacidade de tolerância da espécie vegetal, da severidade e da duração do déficit (Zuffo et al., 2022). Assim, esses fatores são determinantes para o estudo dos impactos dos eventos de estiagem na produção de forragem.

O estado hídrico adequado nas plantas é essencial para a manutenção de seus processos bioquímicos e fisiológicos, logo o déficit hídrico compromete a absorção de nutrientes e a assimilação do carbono (C) (Meisser et al., 2019; Taiz et al., 2015), alterando a homeostase elementar entre C, nitrogênio (N) e fósforo (P). A homeostase elementar representa a capacidade da planta de manter o equilíbrio nutricional apesar das flutuações no ambiente (Yu et al., 2011). As modificações na estequiometria do C tem sido relacionadas à incorporação do Si na parede celular, metabolizado com baixo custo energético comparado à síntese de compostos estruturais de carbono como a lignina (Hao et al., 2020; Klotzbücher et al., 2018), e acumulado pelas gramíneas, fatores que podem favorecer o crescimento da planta cultivada sob estresse. Porém, o Si na forragem é considerado antinutricional, embora estudos recentes evidenciam que ele não afeta a qualidade da matéria seca (Melo et al., 2023).

As estratégias biológicas das gramíneas diante do estresse hídrico são essenciais para sua perenidade, porém, isso demanda energia e implica em prejuízos à fotossíntese (Habermann et al., 2019; Tejera-Nieves et al., 2023). Logo, a perda dessa condição de equilíbrio pode prejudicar a eficiência de uso de nutrientes nas forrageiras (Elser et al., 2010; Olivera- Viciado et al., 2021; Rocha et al., 2022), isto é, sua conversão em biomassa. Dentre as estratégias das plantas para lidar com o déficit hídrico está o acúmulo de solutos orgânicos, a exemplo dos aminoácidos e carboidratos, que auxiliam na diminuição do potencial hídrico foliar para manutenção

das funções celulares e absorção de água (Carmo-Silva et al., 2009; Zulfiqar & Ashraf, 2023).

2.2.2 Impactos da estiagem sobre a morfogênese, produção e qualidade da forragem

A baixa disponibilidade hídrica afeta diretamente os processos de divisão e expansão celular, necessários ao crescimento das plantas (Taiz et al., 2015). Isso é agravado pela limitada absorção de N e P que atuam diretamente na divisão celular, bem como os demais nutrientes fundamentais para as biossínteses vegetais (Prado et al., 2021). Assim, os processos de crescimento das forrageiras (morfogênese) são limitados sob restrição hídrica, podendo alterar suas características estruturais como comprimento de folhas e número de perfilhos, com influência direta na produção de biomassa de folhas e altura do pasto (Fernandes et al., 2008; Fonseca et al., 2011; Martuscello et al., 2019).

Diante das limitações ao crescimento, perfilhamento e produção de massa seca impostas sob déficit hídrico, as gramíneas forrageiras apresentam modificações nos seus processos morfogênicos (Nelson & Moore, 2020) alterando, por exemplo, a velocidade de aparecimento e alongamento de órgãos como perfilhos, folhas e colmos, com consequentes alterações na composição morfológica e química da massa de forragem que será consumida pelos animais (Nelson & Moore, 2020; Zanine et al., 2018). Essas estratégias carecem de investigação em gramíneas forrageiras cultivadas sob estiagens em campo.

2.3 Irrigação e espécies tolerantes: estratégias contra a estiagem

A produção de forragem é prejudicada pela baixa disponibilidade hídrica ao diminuir a taxa de acúmulo de forragem, e consequentemente a capacidade de suporte da pastagem, isto é, quantas unidades animais (UA) são suportadas por um hectare de pastagem, considerando a UA igual a 450 kg de peso vivo. Uma alternativa consagrada para lidar com os períodos de seca é a irrigação das pastagens, que pode eliminar a sazonalidade de produção em regiões onde a temperatura e a luminosidade não são limitantes (Drumond & Aguiar, 2005; Silva et al., 2012).

Diferentes sistemas de irrigação podem ser utilizados em pastagens, sendo mais comum os sistemas de aspersão por pivô central ou aspersão fixa com tubulação enterrada (Jesus et al., 2021). Mais recentemente, uma ênfase tem sido dada à utilização de sistemas de irrigação mais eficientes nas pastagens, como o gotejamento subterrâneo (Rocha et al., 2025). Esse sistema possibilita a fertirrigação das pastagens, pela qual se aplica água e nutrientes diretamente na zona radicular, mas é necessário elucidar se o gotejamento subterrâneo beneficia de forma concisa as gramíneas forrageiras em períodos de estiagem, considerando que esse sistema tem custo de implantação superior aos sistemas de aspersão (Allen & MacAdam, 2020).

Um importante fator a ser considerado em sistemas de pastagens irrigadas é a espécie forrageira. As gramíneas se diferenciam no seu hábito de crescimento, potencial produtivo e tolerância a estresses, havendo um constante esforço da pesquisa em selecionar materiais genéticos que contribuam para uma produção a pasto mais eficiente (Jank et al., 2014). Algumas cultivares tem se popularizado, como a *M. maximus* cv. Zuri e a *Urochloa brizantha* x *Urochloa ruziziensis* cv. Mavuno, com alto potencial produtivo e responsividade em sistemas mais intensivos e irrigados (Leal et al., 2023; Mattos et al., 2023). No entanto, a responsividade dessas forrageiras à irrigação em condições de estiagem não são conhecidos, o que é necessário para nortear sua recomendação em sistemas irrigados, especialmente em regiões com irregularidades na distribuição de chuva no período das águas.

3 Referências

- ABIEC. (2024). *Beef Report*. <https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2024-perfil-da-pecuaria-no-brasil/>
- Allen, L. N., & MacAdam, J. W. (2020). Irrigation and Water Management. Em *Forages* (p. 497–513). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch27>
- Bernardo, S., Mantovani, C., Silva, DD. & Soares, AA., (2019). *Manual de irrigação* (9º ed) Viçosa, MG: UFV. 545p.

- Cardoso, J. A., Pineda, M., Jiménez, J. de la C., Vergara, M. F., & Rao, I. M. (2015). Contrasting strategies to cope with drought conditions by two tropical forage C₄ grasses. *AoB Plants*, 7, plv107. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv107>
- Carmo-Silva, A. E., Francisco, A., Powers, S. J., Keys, A. J., Ascensão, L., Parry, M. A. J., & Arrabaça, M. C. (2009). Grasses of different C₄ subtypes reveal leaf traits related to drought tolerance in their natural habitats: Changes in structure, water potential, and amino acid content. *American Journal of Botany*, 96(7), 1222–1235. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800224>
- Catunda, K. L. M., Churchill, A. C., Zhang, H., Power, S. A., & Moore, B. D. (2022). Short-term drought is a stronger driver of plant morphology and nutritional composition than warming in two common pasture species. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(6), 841–852. <https://doi.org/10.1111/jac.12531>
- Chand, S., Indu, Singhal, R. K., & Govindasamy, P. (2022). Agronomical and breeding approaches to improve the nutritional status of forage crops for better livestock productivity. *Grass and Forage Science*, 77(1), 11–32. <https://doi.org/10.1111/gfs.12557>
- Cucchi, T., & Arbuckle, B. (2021). Animal domestication: from distant past to current development and issues. *Animal Frontiers*, 11(3), 6–9. <https://doi.org/10.1093/af/vfab013>
- Dejene, T., Dalle, G., Woldeamanuel, T., & Mekuyie, M. (2023). Temporal climate conditions and spatial drought patterns across rangelands in pastoral areas of West Guji and Borana zones, Southern Ethiopia. *Pastoralism*, 13(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s13570-023-00278-4>
- Drumond, L. C. D., & Aguiar, A. P. A. (2005). *Irrigação de Pastagem* (1^o ed).
- Elser, J. J., Fagan, W. F., Kerkhoff, A. J., Swenson, N. G., & Enquist, B. J. (2010). Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 186(3), 593–608. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03214.x>
- FAO. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm#Contents>
- Fernandes, F. M., de Mello Prado, R., Isepon, O. J., & Kawatoko, M. (2008). Zootecnia tropical. *Zootecnia Tropical*, 26(2), 125–131. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692008000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=pt

- Fonseca, I. M., Prado, R. M., Nogueira, T. A. R., & Barbosa, J. C. (2011). Macronutrients in Marandu Palisade Grass as Influenced by Lime, Slag, and Nitrogen Fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(7), 844–857. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.552659>
- Guenni, O., Marín, D., & Baruch, Z. (2002). Responses to drought of five *Brachiaria* species. I. Biomass production, leaf growth, root distribution, water use and forage quality. *Plant and Soil*, 243(2), 229–241. <https://doi.org/10.1023/A:1019956719475>
- Habermann, E., Oliveira, E. A. D., Contin, D. R., Delvecchio, G., Oliveira-Viciedo, D. O., Moraes, M. A., Prado, R. de M., Costa, K. A. de P., Braga, M. R., & Martinez, C. A. (2019). Warming and water deficit impact leaf photosynthesis and decrease forage quality and digestibility of a C4 tropical grass. *Physiologia plantarum*, 165(2), 383–402. <https://doi.org/10.1111/ppl.12891>
- Hao, Q., Yang, S., Song, Z., Li, Z., Ding, F., Yu, C., Hu, G., & Liu, H. (2020). Silicon Affects Plant Stoichiometry and Accumulation of C, N, and P in Grasslands. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01304>
- Jank, L., Barrios, S. C., Valle, C. B., Simeão, R. M., & Alves, G. F. (2014). The value of improved pastures to Brazilian beef production. *Crop and Pasture Science*, 65(11), 1132. <https://doi.org/10.1071/CP13319>
- Jesus, F. L. F., Sanches, A. C., Souza, D. P., Mendonça, F. C., Gomes, E. P., Santos, R. C., Santos, J. E. O., & Silva, J. L. B. (2021). Seasonality of biomass production of irrigated Mombaça ‘Guinea grass’. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 71(3), 156–164. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1863456>
- Klotzbücher, T., Klotzbücher, A., Kaiser, K., Vetterlein, D., Jahn, R., & Mikutta, R. (2018). Variable silicon accumulation in plants affects terrestrial carbon cycling by controlling lignin synthesis. *Global Change Biology*, 24(1). <https://doi.org/10.1111/gcb.13845>
- Leal, V. N., Santos, D. de C., Paim, T. do P., Santos, L. P. dos, Alves, E. M., Claudio, F. L., Calgaro Junior, G., Fernandes, P. B., & Salviano, P. A. P. (2023). Economic Results of Forage Species Choice in Crop–Livestock Integrated Systems. *Agriculture*, 13(3), 637. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030637>
- Marcelino, K. R. A., Nascimento Junior, D. do, Silva, S. C. da, Euclides, V. P. B., & Fonseca, D. M. da. (2006). Características morfogênicas e estruturais e produção de forragem do capim-marandu submetido a intensidades e freqüências de desfolhação. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 35(6), 2243–2252. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000800007>

- Marengo, J. A., Torres, R. R., & Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3), 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- Martuscello, J. A., Rios, J. F., Ferreira, M. R., Assis, J. A., Braz, T. G. S., & Cunha, D. N. F. V. (2019). Produção e morfogênese de capim BRS Tamani sob diferentes doses de nitrogênio e intensidades de desfolhação. *Boletim de Indústria Animal*, 76. <https://doi.org/10.17523/bia.2019.v76.e1441>
- Mattos, R. F., Matuo, C. M., Herling, V. R., Tech, A. R. B., & Pereira, L. E. T. (2023). Canopy leaf area and leaf mass in the upper stratum of <scp> *Urochloa* </scp> hybrid ‘Mavuno’ grass subjected to nitrogen fertilisation. *Grass and Forage Science*, 78(3), 359–375. <https://doi.org/10.1111/gfs.12614>
- Meisser, M., Vitra, A., Deléglise, C., Dubois, S., Probo, M., Mosimann, E., Buttler, A., & Mariotte, P. (2019). Nutrient limitations induced by drought affect forage N and P differently in two permanent grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 280, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.027>
- Melo, C. C. de F., Amaral, D. S., & Prado, R. de M. (2025). The role of mineral nutrients in plant growth under drought stress. Em Etesami H & Chen Y (Orgs.), *Sustainable Agriculture under Drought Stress* (p. 195–207). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23956-4.00013-2>
- Melo, C. C. de F., Amaral, D. S., Zanine, A. M., Ferreira, D. de J., Prado, R. de M., & Piccolo, M. de C. (2023). Nanosilica enhances morphogenic and chemical parameters of *Megathyrsus maximus* grass under conditions of phosphorus deficiency and excess stress in different soils. *BMC Plant Biology*, 23(1), 497. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04521-3>
- Nelson, C. J., & Moore, K. J. (2020). Grass Morphology. Em *Forages* (p. 23–49). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch2>
- Nobre, C. A., Marengo, J. A., Seluchi, M. E., Cuartas, L. A., & Alves, L. M. (2016). Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, 08(02), 252–262. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>
- Olivera- Viciado, D., Prado, R. de M., Martinez, C. A., Habermann, E., Branco, R. B. F., Piccolo, M. de C., Calero Hurtado, A., Peña Calzada, K., & Lata Tenesaca, L. F. (2021). Water stress and warming impact nutrient use efficiency of Mombasa grass (*Megathyrsus maximus*) in tropical conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(1), 128–138. <https://doi.org/10.1111/jac.12452>

- Qiu, J., Shen, Z., & Xie, H. (2023). Drought impacts on hydrology and water quality under climate change. *Science of The Total Environment*, 858, 159854. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159854>
- Rocha, J. R., Prado, R. de M., & Piccolo, M. de C. (2022). New outcomes on how silicon enables the cultivation of *Panicum maximum* in soil with water restriction. *Scientific Reports*, 12(1), 1897. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05927-z>
- Rocha, M. O., Miranda, A. G. S., Silva, P. A., Alencar, C. A. B., & Cunha, F. F. (2025). Performance of 'Sabiá' Grass Irrigated with Drippers Installed in the Subsurface. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1002/ird.3081>
- Santos, M. L., Santos, P. M., Barioni, L. G., Pereira, B. H., Cuadra, S. V., Pequeno, D. N. L., Marin, F. R., & Sollenberger, L. (2024). Yield gap analysis framework applied to pasture-based livestock systems in Central Brazil. *Field Crops Research*, 314, 109416. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2024.109416>
- Silva, E. A. da, Silva, W. J. da, Barreto, A. C., Oliveira Junior, A. B. de, Paes, J. M. V., Ruas, J. R. M., & Queiroz, D. S. (2012). Dry matter yield, thermal sum and base temperatures in irrigated tropical forage plants. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41(3), 574–582. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000300014>
- Sloat, L. L., Gerber, J. S., Samberg, L. H., Smith, W. K., Herrero, M., Ferreira, L. G., Godde, C. M., & West, P. C. (2018). Increasing importance of precipitation variability on global livestock grazing lands. *Nature Climate Change*, 8(3), 214–218. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0081-5>
- Souza, R., Hartzell, S., Feng, X., Dantas Antonino, A. C., de Souza, E. S., Cezar Menezes, R. S., & Porporato, A. (2020). Optimal management of cattle grazing in a seasonally dry tropical forest ecosystem under rainfall fluctuations. *Journal of Hydrology*, 588, 125102. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125102>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (Taiz L, Zeiger E, Møller IM, & Murphy A, Orgs.; 6^o ed). Sinauer Associates Incorporated.
- Tejera-Nieves, M., Abraha, M., Chen, J., Hamilton, S. K., Robertson, G. P., & Walker, B. J. (2023). Seasonal decline in leaf photosynthesis in perennial switchgrass explained by sink limitations and water deficit. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1023571>
- Yu, Q., Elser, J. J., He, N., Wu, H., Chen, Q., Zhang, G., & Han, X. (2011). Stoichiometric homeostasis of vascular plants in the Inner Mongolia grassland. *Oecologia*, 166(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00442-010-1902-z>

- Zanine, AM., Nascimento, D., Silva, WL., Sousa, BML., Ferreira, DJ., Silveira, MCT., Parente, HN., & Santos, MER. (2018). Morphogenetic and structural characteristics of guinea grass pastures under rotational stocking strategies. *Experimental Agriculture*, 54(2), 243–256. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000223>
- Zuffo, A. M., Steiner, F., Aguilera, J. G., Ratke, R. F., Barrozo, L. M., Mezzomo, R., Santos, A. S. dos, Gonzales, H. H. S., Cubillas, P. A., & Ancca, S. M. (2022). Selected Indices to Identify Water-Stress-Tolerant Tropical Forage Grasses. *Plants*, 11(18), 2444. <https://doi.org/10.3390/plants11182444>
- Zulfiqar, F., & Ashraf, M. (2023). Proline Alleviates Abiotic Stress Induced Oxidative Stress in Plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(8), 4629–4651. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10839-3>

CAPÍTULO 2 – A irrigação mitiga prejuízos da estiagem em gramíneas forrageiras ao melhorar aspectos nutricionais e produtivos¹

RESUMO - A produção de forragem é comprometida pelo déficit hídrico, no entanto, é pouco explorado como os períodos de estiagem na época de chuvas impactam a produção de diferentes espécies de gramíneas forrageiras. Além disso, é preciso elucidar as estratégias utilizadas por essas plantas para tolerar o déficit hídrico e o potencial de uso da irrigação durante estiagens em pastagens. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos do déficit hídrico ocorrido na estação primavera-verão nos aspectos nutricionais, produtivos e na composição morfológica da forragem dos capins Mavuno e Zuri e analisar o potencial de mitigação dos prejuízos da estiagem pelo uso da irrigação. Foi realizado um experimento de campo em Jaboticabal, SP, com tratamentos organizados em DBC em esquema fatorial 2 x 2, sendo duas condições hídricas de cultivo (sequeiro e irrigado) e duas gramíneas forrageiras (Zuri e Mavuno) em quatro blocos. A restrição hídrica causada pela estiagem prejudicou a absorção e acúmulo de nutrientes e alterou o equilíbrio C:N:P nos capins Zuri e Mavuno. O capim Zuri foi mais tolerante ao déficit hídrico pelo acúmulo de aminoácidos (62%), modificações na homeostase C:N:P:Si e manutenção da eficiência de uso de C e nutrientes minerais. A irrigação no capim Mavuno melhorou suas eficiências de uso de nutrientes, o perfilhamento e a produção de forragem (+ 41%), sendo responsivo à irrigação. A composição morfológica da forragem foi melhorada no cultivo irrigado para ambas espécies forrageiras. Conclui-se que os períodos de estiagem prejudicam a produção de gramíneas sensíveis, e a irrigação mitiga a perda na produção forragem nesses períodos de restrição hídrica na primavera-verão.

Palavras-chave: déficit hídrico; eficiência de uso de nutrientes; gotejamento; *Megathyrus*; pastagem; *Urochloa*

¹ Este capítulo corresponde ao artigo científico submetido à revista *Scientific Reports* e encontra-se em avaliação para publicação.

Irrigation reduces drought-related losses in forage grasses by enhancing nutritional and productive characteristics

ABSTRACT - Forage production is affected by water deficit, but it is not known how grasses cope with dry periods during the rainy season and how irrigation can be used during dry periods in pastures. This field study analyzed the effects of water deficit during the spring-summer season on the nutritional, productive and morphological composition aspects of Mavuno and Zuri grasses, as well as the potential of irrigation to mitigate the damages caused by drought, using a randomized complete block design in a 2 x 2 factorial scheme, with two water conditions (rainfed and irrigated) and two forage grasses (Zuri and Mavuno) in four blocks. Water restriction impaired nutrient uptake and accumulation, and altered the C:N:P balance in Zuri and Mavuno grasses. Zuri grass was more tolerant to water deficit due to amino acid accumulation (62%), modifications in C:N:P:Si homeostasis, and maintenance of C and mineral nutrient use efficiency. Irrigation in Mavuno grass improved nutrient use efficiency, tillering, and forage production (41%), showing a positive response to irrigation. The morphological composition of forage improved under irrigated conditions for both forage species. Therefore, drought periods impair the production of sensitive grasses, and irrigation mitigates forage production losses during these water restriction periods in the spring-summer season.

Keywords: drip irrigation; nutrient use efficiency; *Megathyrsus*; pasture; *Urochloa*; water deficit

1 Introdução

A produção animal baseada em pastagens permite fornecer de forma sustentável ao mercado global alimentos de alto valor nutritivo para o ser humano, como carne e leite, e as gramíneas forrageiras tropicais são um componente essencial nesses sistemas (Davis et al., 2022; Jayasinghe et al., 2024). No entanto, além da sazonalidade de produção de forragem devido à concentração das chuvas em uma época do ano (Matovu & Alçiçek, 2023; Jayasinghe et al., 2024), há uma crescente variabilidade na precipitação durante a estação chuvosa, que causa períodos de restrição hídrica, comprometendo o acúmulo de forragem nas pastagens inclusive no Brasil Central (Dejene et al., 2023; Santos et al., 2024).

O estado hídrico adequado nas plantas é essencial para a manutenção de seus processos bioquímicos e fisiológicos, por isso, o déficit hídrico pode comprometer a absorção de nutrientes e a assimilação do carbono (C) (Taiz et al., 2015; Meisser et al., 2019), alterando a homeostase elementar entre C, nitrogênio (N) e fósforo (P). A homeostase elementar representa a capacidade da planta de manter o equilíbrio nutricional apesar das flutuações no ambiente (Yu et al., 2011). A perda dessa condição de equilíbrio pode prejudicar a eficiência de uso de nutrientes em gramíneas (Elser et al., 2010; Olivera-Viciedo et al., 2021; Rocha et al., 2022), e como consequência, o crescimento, perfilhamento e produção de massa seca podem ser diminuídos (Nelson & Moore, 2020). Porém, os estudos nesse tema investigam majoritariamente déficits severos simulando seca, sendo necessário avançar para ensaios de campo que considerem a ocorrência de períodos de déficit hídrico dentro da estação chuvosa.

Plantas sob restrição hídrica acionam estratégias como o acúmulo de solutos orgânicos, a exemplo dos aminoácidos, que auxiliam na diminuição do potencial hídrico foliar para manutenção das funções celulares (Carmo-Silva et al., 2009; Zulfiqar & Ashraf, 2023), bem como carboidratos (Kumar et al., 2021). Outra estratégia é o acúmulo de silício (Si), elemento benéfico com ação antiestresse nas plantas, que otimiza o combate ao estresse em gramíneas sob déficit hídrico (Bhardwaj & Kapoor, 2021; Rocha et al., 2022). No entanto, há pouco foco nos impactos dos períodos curtos de restrição hídrica nos aspectos acima citados (Guenni et al., 2002; Cardoso et al.,

2015), e que carecem de atualização em relação cultivares lançadas mais recentemente.

As estratégias biológicas das gramíneas diante do estresse hídrico são essenciais para sua perenidade, porém, isso demanda energia e implica em prejuízos à fotossíntese (Habermann et al., 2019; Tejera-Nieves et al., 2023). Uma prática que mitiga esses prejuízos é a irrigação de pastagens, que pode ser realizada com sistemas eficientes como o gotejamento subterrâneo (Arslan et al., 2024; Melo et al., 2020; Souza et al., 2021). Sabe-se que a irrigação pode mitigar a sazonalidade de produção de forragem na época seca (Silva et al., 2012; Jesus et al., 2021), mas ainda são necessários estudos sobre os benefícios do uso da irrigação em pastagens submetidas à restrição hídrica devido a estiagens.

Nos últimos anos foram lançadas novas cultivares de gramíneas forrageiras tropicais, desenvolvidas para elevar a produção dos sistemas de produção a pasto (Jank et al., 2014). Algumas dessas forrageiras são a *Megathyrsus maximus* cv. Zuri e a *Urochloa brizantha* x *U. ruziziensis* cv. Mavuno, que apresentam alto potencial de produção e responsividade ao manejo mais intensivo com fertirrigação (Leal et al., 2023; Mattos et al., 2023). No entanto, não se conhece os mecanismos utilizados por essas cultivares quando submetidas a períodos curtos de déficit hídrico, ou aqueles que mais contribuem para sua produção sem restrição hídrica.

O contexto exposto motivou a investigação das seguintes questões: i) Períodos curtos de restrição hídrica (estiagem) durante a primavera-verão desencadeiam prejuízos nutricionais e produtivos nos capins Mavuno e Zuri; ii) A tolerância à restrição hídrica depende da espécie forrageira e está relacionada com seus mecanismos biológicos de homeostase elementar, eficiência de uso de nutrientes e acúmulo de solutos; iii) A irrigação pode mitigar os prejuízos do déficit hídrico causado por estiagem na produção de gramíneas forrageiras ao otimizar a homeostase e a eficiência de uso de nutrientes. Espera-se compreender os principais mecanismos de tolerância à restrição hídrica durante estiagens de duas espécies de gramíneas forrageiras de amplo cultivo em pastagens tropicais, e elucidar os efeitos e relevância do uso da irrigação para mitigar os prejuízos da variabilidade das chuvas na produção das pastagens na primavera-verão.

Portanto, os objetivos dessa pesquisa foram avaliar os prejuízos nutricionais e produtivos do déficit hídrico no cultivo dos capins Mavuno e Zuri em sequeiro na primavera-verão, e o potencial de mitigação dos prejuízos da estiagem pelo uso da irrigação.

2 Material e métodos

2.1 Condições de cultivo

A pesquisa foi desenvolvida com o cultivo de gramíneas forrageiras em condição de campo na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Estadual Paulista, em Jaboticabal, São Paulo. A área experimental encontra-se nas coordenadas 21° 14' 54" S e 48° 17' 06" W, altitude de 560 m. O clima da região é classificado como Aw tropical chuvoso com inverno seco (Alvares et al., 2013) apresentando estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro. O experimento teve duração de outubro de 2022 a abril de 2023, durante as estações primavera-verão, sendo registrados os dados meteorológicos de evapotranspiração, temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar global e precipitação pluvial (Fig 1) obtidos da estação meteorológica da universidade, os dados médios diários do período foram 7.8, 4.5 mm d⁻¹, 30.3, 18.8 °C e 20.38 MJ m⁻² para chuva, evapotranspiração potencial, temperatura máxima e mínima e radiação solar global, respectivamente, a evapotranspiração potencial do período foi de 820.6 e a chuva 1415.3 mm.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) (Andrioli & Centurion, 1999), correspondente a Ferralsol na World Reference Base – FAO ou Eutruxox na Soil Taxonomy. O solo foi amostrado para análise química antes da realização do experimento (Raij et al., 2001), com os seguintes resultados para as camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade respectivamente: pH: 5.8 e 6.0, matéria orgânica (MO): 22 e 22 g dm⁻³, P: 78 e 51 mg dm⁻³, potássio (K): 5.5 e 3.6, cálcio (Ca): 46 e 44, magnésio (Mg): 15 e 15 mmol_c dm⁻³, enxofre (S): 3 e 4, boro (B): 0.32 e 0.25, cobre (Cu): 3.4 e 3.5, ferro (Fe): 6 e 5, manganês (Mn): 25.5 e 18.6, e zinco (Zn): 1.6 e 1 mg dm⁻³, H+Al = 21 e 18 mmol_c dm⁻³, CTC (capacidade de troca catiônica): 88 e 81 mmol_c dm⁻³, V (Saturação por bases:

Ca + Mg +K/CTC): 76 e 77%, argila: 582 e 591 g kg⁻¹, silte: 235 e 231 g kg⁻¹, areia: 183 e 178 g kg⁻¹, solo de textura argilosa.

Foi realizado o preparo do solo com gradagem no mês de fevereiro de 2022, e em seguida instalou-se o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial, com as mangueiras gotejadoras localizadas em sulcos de 20 cm de profundidade. O espaçamento entre as mangueiras gotejadoras foi de 80 cm, dotada de gotejadores da marca Petroisa, modelo Durazio, com vazão de 1,45 L h⁻¹, espaçados em 30 cm na mangueira. O sistema apresentou excelente uniformidade, com coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) de 94,7 e coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) de 93,4% respectivamente (Bernardo et al., 2019).

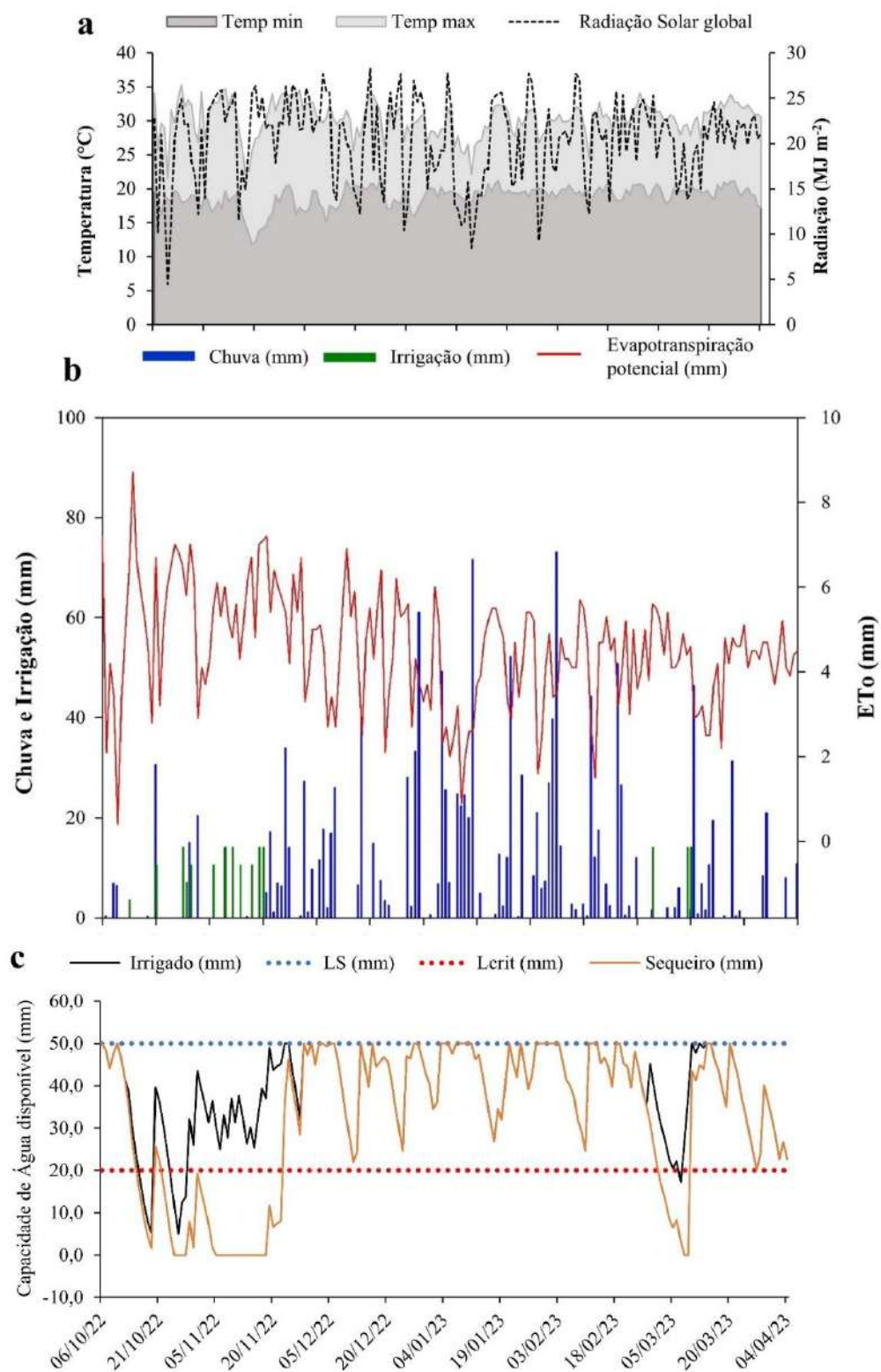


Fig 1 Temperatura do ar e radiação solar global (a), volume de chuvas, irrigação e evapotranspiração potencial (b), capacidade de água disponível no solo (c) durante o período experimental de outubro de 2022 a abril de 2023, Jaboticabal-SP.

2.2 Tratamentos, desenho experimental e manejos

Os tratamentos foram organizados em delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 2, sendo duas espécies forrageiras (braquiária híbrida *Urochloa brizantha* x *U. ruziziensis* cv. Mavuno e *Megathyrsus maximus* cv. Zuri (Embrapa, 2014; Wolf Seeds, 2016), e duas condições de fornecimento de água (irrigado e sequeiro). Os tratamentos foram distribuídos em quatro blocos casualizados, que constituíram as repetições.

Foram delimitadas parcelas de 3 x 4,8 m (14,4 m²), sendo 50 cm considerados bordadura, que foram semeadas no mês de abril de 2022, espalhando as sementes manualmente em cada parcela em quantidade equivalente a 10 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis da respectiva forrageira. Após o crescimento inicial das plantas procedeu-se um corte para estimular o perfilhamento basal das plantas, utilizando roçadora manual.

Em outubro de 2022 procedeu-se um corte de uniformização respeitando as alturas de resíduo de 35 e 15 cm para os capins Zuri e Mavuno, respectivamente (Barbosa et al., 2021; Silva et al., 2020). Em seguida iniciou-se a aplicação dos tratamentos, com parcelas irrigadas por gotejamento subterrâneo ou em sequeiro (sem irrigação). O armazenamento de água no solo foi definido previamente a partir da capacidade de campo e ponto de murcha permanente determinados em curva de retenção de água do solo, construída em ensaio com amostras indeformadas em câmara de pressão de Richards (Klute, 1986). Nas parcelas irrigadas, a lâmina e o intervalo entre irrigações foram definidos com base na reposição de 100% da evapotranspiração, considerando a capacidade de armazenamento de água no solo de 50 mm (até 0,4 m), as irrigações foram realizadas quando eram perdidos 30 mm de água do solo ($f = 0.60$), desta forma, foi aplicada uma lâmina de 175 mm nas parcelas irrigadas durante o período avaliado.

A adubação de manutenção foi realizada no terceiro dia após cada corte do pasto, repondo a quantidade de 25, 25, 3 e 2 kg t⁻¹ de MS de N, K, P, e S, respectivamente, exportada na massa seca (MS) pelas forrageiras em cada tratamento (Quaggio et al., 2022; Dubeux Jr et al., 2007), utilizando as fontes ureia, fosfato monoamônico purificado, cloreto de potássio e sulfato de amônio. Nos tratamentos irrigados foi realizada adubação por fertirrigação, as parcelas em sequeiro

foram adubadas manualmente, distribuindo a lanço, substituindo a fonte fosfato monoamônico por superfosfato simples.

2.3 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada de outubro de 2022 até abril de 2023, período no qual foram analisados diversas variáveis, conforme descrito a seguir.

2.3.1 Parâmetros biométricos, produtivos e composição morfológica da biomassa

A altura das plantas (cm) foi aferida em cinco pontos por parcela imediatamente antes do corte do pasto, utilizando régua de manejo graduada. Foram realizadas avaliações para estimativa do número de perfilhos por m² das forrageiras em cada tratamento. Para isso, foram delimitadas por moldura plástica de 625 cm² touceiras dos capins, e após cada corte fez-se a contagem dos perfilhos mortos e vivos, permitindo obter a média de perfilhos vivos por m² (Bahmani et al., 2003).

Para determinar a produção de forragem realizou-se coletas do estrato pastejável utilizando um podão, no horário entre 07 e 09 am, sempre que o pasto atingia alturas de entrada de 85 e 35 cm e altura de resíduo de 35 e 15 cm, para os capins Zuri e Mavuno, respectivamente, com base na interceptação luminosa de 95% pelo dossel (Barbosa et al., 2021; Silva et al., 2020). Ao todo foram realizados dez e sete cortes no pasto nos tratamentos irrigado e não irrigado, respectivamente. Utilizou-se molduras de 2,25 e 1,0 m² para os capins Zuri e Mavuno, respectivamente, e a forragem coletada nessa área foi pesada imediatamente, obtendo a massa fresca. Após a amostragem, a uniformização da altura de resíduo do pasto foi realizada com roçadora manual e o material retirado da parcela.

No momento da coleta, uma amostra de aproximadamente 100 g de massa fresca foi pesada e levada à estufa de circulação forçada de ar a 65 ± 5 °C até massa constante, para obtenção da MS. Com os teores de MS, altura do pasto, e duração do ciclo, calculou-se a produção de massa de forragem (MF, Mg ha⁻¹ de MS), a densidade da massa de forragem (DMF, kg ha⁻¹ cm⁻¹ de MS), a taxa de acúmulo de forragem (TAF, kg ha⁻¹ d⁻¹ de MS), e estimou-se a capacidade de suporte (CS, UA ha⁻¹, onde UA = unidade animal ou 450 kg peso vivo).

Uma segunda amostra de forragem fresca foi utilizada para o fracionamento morfológico da biomassa em lâmina foliar, colmo e material morto, que foram secas em estufa 65 ± 5 °C até massa constante. Calculou-se então os percentuais das frações morfológicas lâmina foliar, colmo e material morto na matéria seca das gramíneas (Marcelino et al., 2006).

2.3.2 Determinação dos teores de nutrientes

As amostras secas da massa do estrato pastejável foram passadas em moinho tipo Willey. Foi realizada extração em meio sulfúrico para análise de N, com destilação do extrato em meio alcalino NaOH 15N (método Kjeldahl), e titulação com H₂SO₄ 0,05 N. O B foi extraído por digestão em mufla e determinado em espectrofotômetro. Para P, Ca, Mg, S, K, Cu, Zn, Mn e Fe realizou-se extração em meio nítrico-perclórico, com leitura do extrato em espectrofotômetro a 420 nm para determinação de P e S (B442, Micronal, BR). Os demais nutrientes foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Bataglia et al., 1983).

O teor de C foi determinado a partir da digestão úmida amostra com solução de K₂Cr₂O₇ e titulação com FeSO₄ pelo método de Walkley-Black modificado (Tedesco et al., 1995). O teor de silício (Si) foi obtido por digestão alcalina da amostra em peróxido de hidrogênio a 120°C (Kraska & Breitenbeck, 2010), e leitura em espectrofotômetro a 410 nm após reação colorimétrica com molibdato de amônio (Korndörfer et al., 2004).

2.3.3 Razões estequiométricas e eficiências de uso de nutrientes

Foram calculadas as razões C:N, C:P, N:P e C:Si utilizando os teores de C, N, P e Si na massa seca. O acúmulo dos nutrientes (kg ha⁻¹) foi obtido multiplicando a massa seca produzida pelos respectivos teores dos elementos. Foram estimadas as eficiências de uso de C (EUC), N (EUN), P (EUP), K (EUK), Ca (EUCa), Mg (EUMg) e S (EUS) pela planta, com a equação: (massa de forragem/acúmulo nutriente), e também a eficiência do uso da água sendo expressas em kg kg⁻¹ (Siddiqi & Glass, 2008 modificado).

2.3.4 Carboidratos e aminoácidos totais

Determinou-se a concentração de carboidratos e aminoácidos totais utilizando 1,0 g de material vegetal seco (massa do estrato pastejável) para extração em 10 mL de solução metanol-clorofórmio-água (MCA 60:25:15%). Após adição da solução sobre a amostra, os tubos falcon foram armazenados em geladeira por 48h. Após esse período, retirou-se 4 mL de sobrenadante no qual foi adicionado 1 mL de clorofórmio e 1,5 mL de água deionizada, levando à geladeira por 24h.

Para determinação do teor de carboidratos, procedeu-se a reação de 0,5 mL de extrato com 0,5 mL de fenol 5% e 2 mL de ácido sulfúrico concentrado, e leitura em espectrofotômetro a 490 nm (Dubois et al., 1956). Para determinar aminoácidos foi retirado 1mL do extrato, adicionou-se 500 µL citrato de sódio 0.2 M, 200 µL solução ninhidrina 5% em éter monometílico de etilenoglicol, e 1 mL solução KCN 0,0002 M. O ensaio foi então aquecido a 100 °C por 20 minutos e, em seguida resfriado por 10 minutos em água corrente. Foi adicionado 1 mL de álcool etílico 60%, seguindo-se leitura em espectrofotômetro a 570 nm (Yemm et al., 1955).

2.4 Análise estatística dos dados

Os dados foram submetidos a análise de pressupostos normalidade, homogeneidade e independência dos resíduos (Jarque & Bera, 1980; Bartlett, 1937), e em seguida procedeu-se análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$). Quando identificada diferença entre as médias, fez-se a comparação pelo teste Tukey ($p < 0,05$), utilizando o software estatístico SPEED Stat versão 3.2 (Carvalho et al., 2020).

Para analisar as relações entre as variáveis foi realizada uma análise de correlação de Pearson entre as variáveis para cada condição hídrica ($p < 0,05$). Além disso, procedeu-se a análise de componentes principais, obtida a partir da matriz de covariância, padronização z-score e razão $NC < 120$, a análise de agrupamento hierárquico pela distância euclidiana, e a análise de cluster pelo método de ligação simples. As análises foram realizadas utilizando a linguagem de programação R (R Studio versão 4.3.3).

3 Resultados

3.1 Teores e acúmulos de macronutrientes e Si

Observou-se interação significativa (p -valor < 0,05) entre os fatores espécie e condição hídrica para o teor de Si, S e Mg na MS, bem como para os acúmulos de P, Si, K e Mg (Fig 2 a-h; Fig 3 a-h).

O cultivo irrigado em relação ao sequeiro promoveu no capim Mavuno diminuição nos teores de N (-7%), K (-17%), S (-11%), e aumento nos teores de P (+18%) e Si (+27%) sem alterar os teores de C, Ca e Mg na MS. Também foi observado para o Mavuno o aumento nos acúmulos de N, P, C, Si, K, S, Ca e Mg (Fig 2 a-h; Fig 3 a-h).

No capim Zuri sob irrigação observou-se diminuição no teor de K (-22%), e incremento nos teores de P, Si e Mg, comparado ao cultivo sem irrigação. Observou-se também o aumento nos acúmulos de P (+15%), Si (+53%), e Mg (+64%), bem como diminuição no acúmulo de K, sem alterar os teores ou acúmulos de N, C, S e Ca (Fig 2 a-h; Fig 3 a-h).

Comparando as espécies em função da condição de cultivo, notou-se que em sequeiro o capim Zuri apresentou menores teores de P, C, S, e maiores teores de Si e Ca, bem como maiores acúmulos de N, C, Si, K, Ca e Mg em comparação com Mavuno na mesma condição. Sob irrigação, houve no capim Zuri em relação ao Mavuno maiores teores de N (+6%), Si (+70%), Ca (+32%) e Mg (+54%), e menores teores de P (-15%) e C (-3%), bem como menores acúmulos de P e K, e maiores acúmulos de Si, Ca e Mg. Os acúmulos de N, C e S não foram alterados pela irrigação (Fig 2 e 3 a-h).

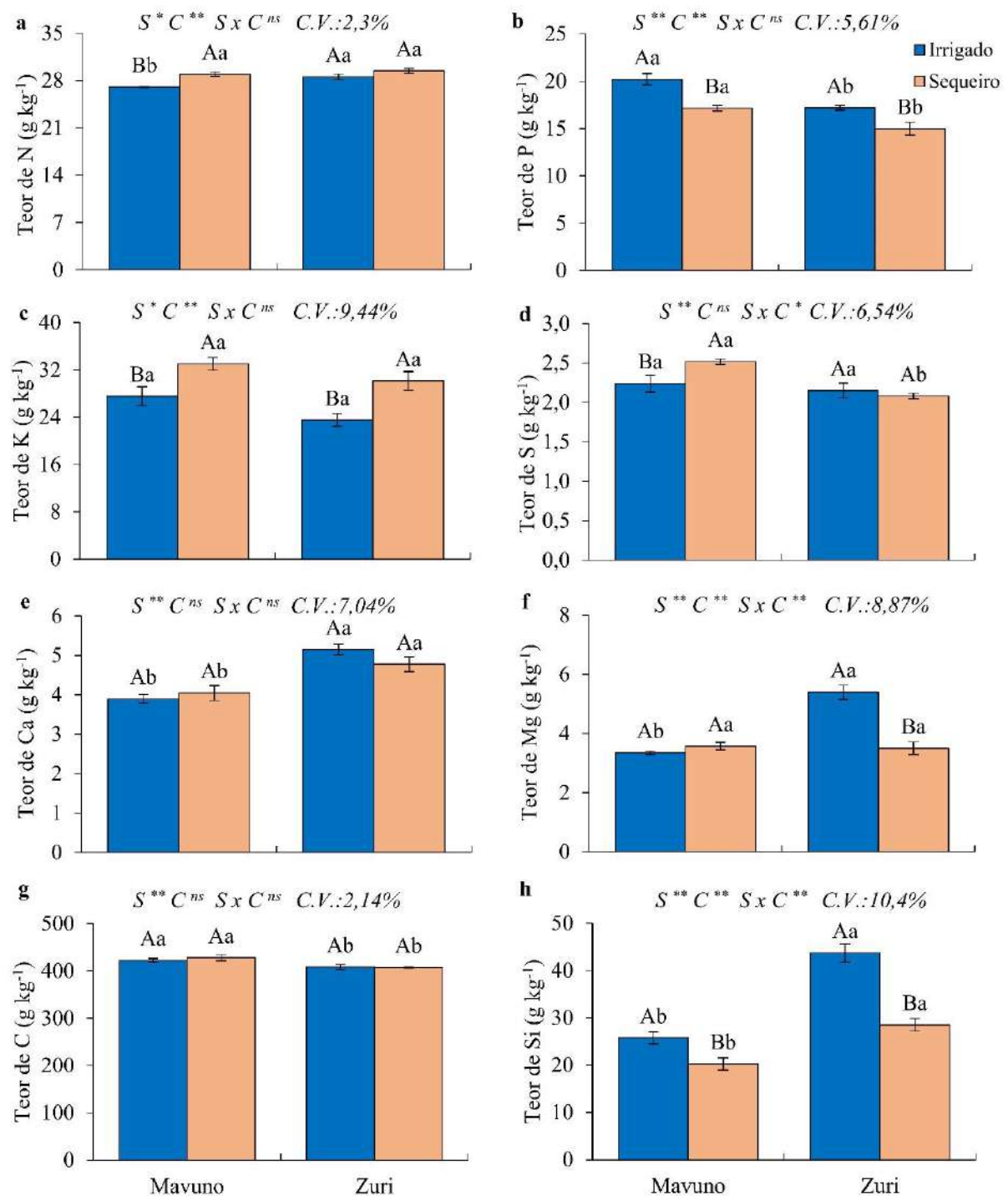


Fig 2 Teores de Nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), enxofre (d), cálcio (e), magnésio (f), carbono (g) e silício (h) na parte aérea do capim Mavuno e do capim Zuri sob condição irrigada e sequeiro em condição de campo em Jaboticabal-SP, Brasil. ^{ns}, * e ** corresponde ao teste F não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente. Médias são comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam medias entre as condições hídricas e letras minúsculas

comparam os efeitos das espécies. Barras representam o erro padrão da média, $n = 4$.

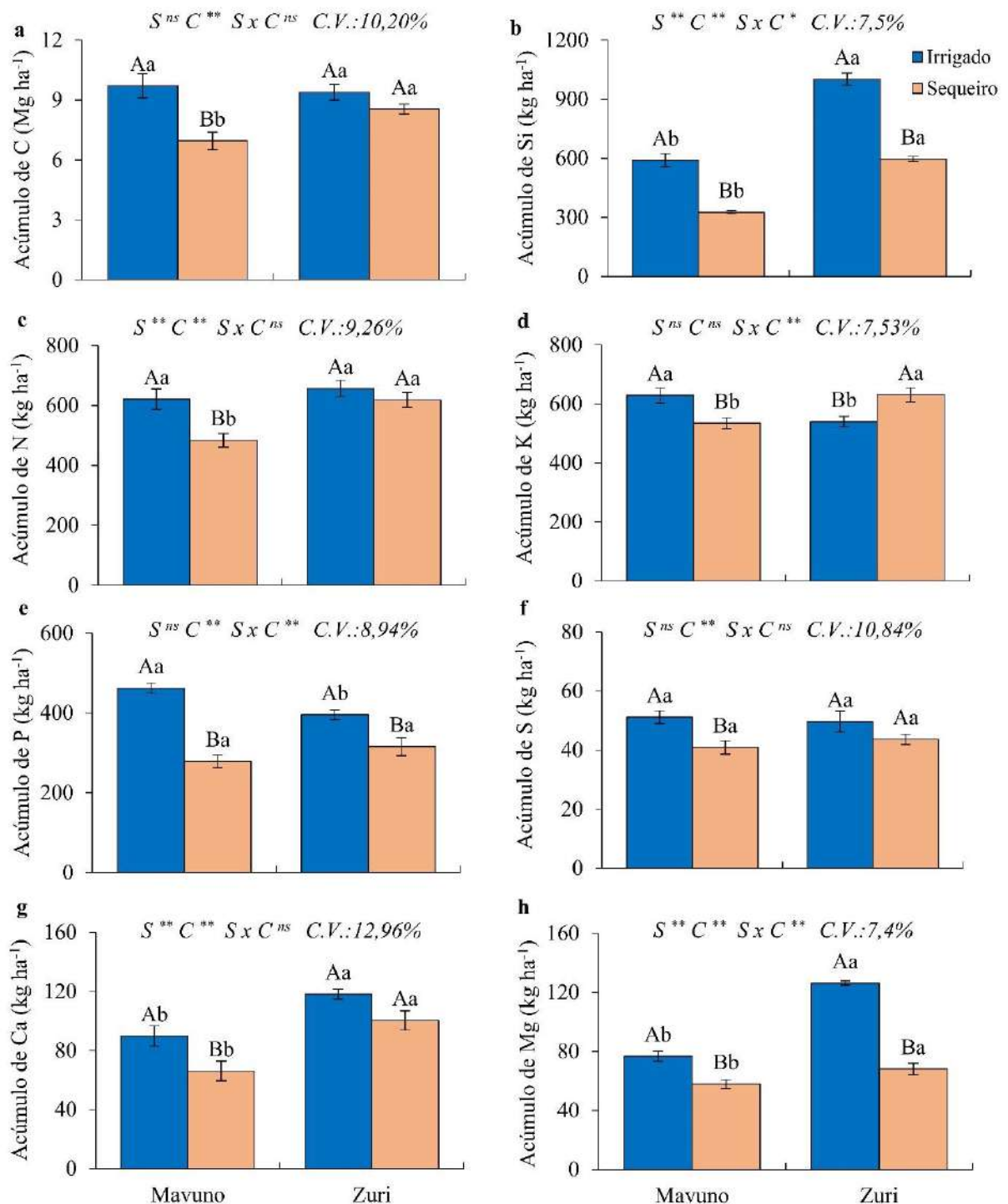


Fig 3 Acúmulos de carbono (a), silício (b), nitrogênio (c), potássio (d), fósforo (e), enxofre (f), cálcio (g) e magnésio (h) na parte aérea do capim Mavuno e do capim Zuri sob condição irrigada e sequeiro em condição de campo em Jaboticabal-SP, Brasil. ^{ns}, * e ** corresponde ao teste F não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente. Médias são comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam medias entre as condições hídricas e letras minúsculas

comparam os efeitos das espécies. Barras representam o erro padrão da média, $n = 4$.

3.2 Teores e acúmulos de micronutrientes, e teores de aminoácidos e carboidratos totais

Houve interação significativa (p -valor $< 0,05$) entre os fatores espécie e condição hídrica para os teores de Cu, Mn, e Fe na MS (Fig 4 a, d, e).

Observou-se que a irrigação em comparação com o cultivo em sequeiro promoveu diminuição nos teores de Cu e Fe, e aumento no acúmulo de Cu (30%), Zn (+39%) e B (+40%) no capim Mavuno (Fig 4 a-g; Fig 5 a-e). No capim Zuri houve aumento nos teores de Cu e Mn, e a diminuição no teor de aminoácidos totais (Fig 4 a, d, f), bem como maiores acúmulos de Cu (+22%) e Mn (+51%) em comparação ao seu cultivo em sequeiro (Fig 5 a, d).

No cultivo sem irrigação, o capim Mavuno apresentou maiores teores de Zn, Fe e carboidratos totais (+13%), e ainda maior acúmulo de Fe (+105%) em relação ao capim Zuri nessa mesma condição. Observou-se no capim Zuri maior teor de Mn, e maiores acúmulos de Cu (+22%), B (+34%), e Mn (+90%) em relação ao Mavuno na condição de sequeiro (Fig 4 a-g; Fig 5 a-e).

Analisando as espécies no cultivo irrigado, foi possível observar maiores teores de Cu e Mn, e maior acúmulo de Mn no capim Zuri em relação ao Mavuno, enquanto no capim Mavuno destacou-se seus maiores teores de Zn, Fe, aminoácidos (+61%) e carboidratos totais (+16%) (Fig 4 a-g), e também maiores acúmulos de Zn e Fe em comparação com o capim Zuri na condição irrigada (Fig 5 b, e).

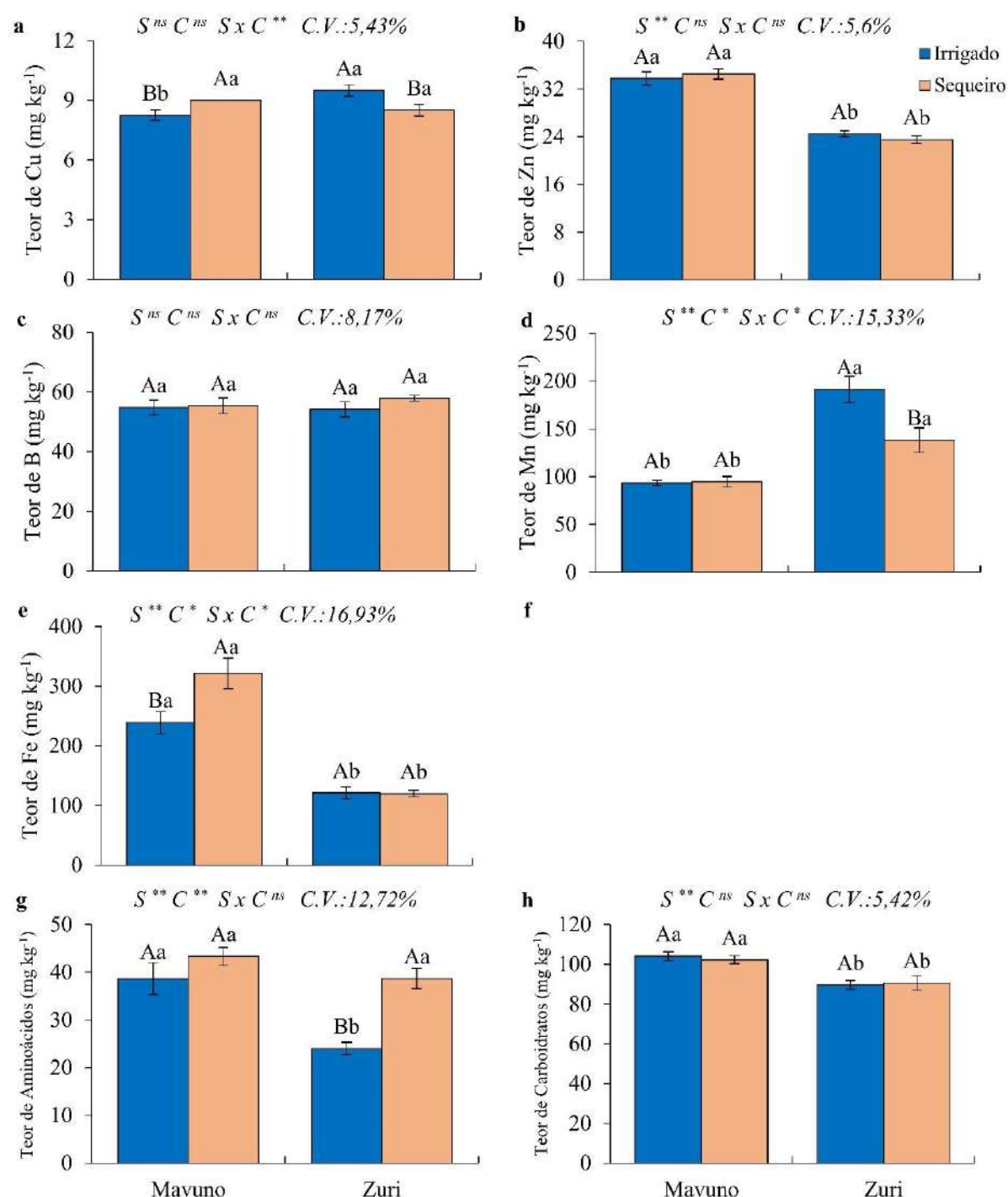


Fig 4 Teores de cobre (a), zinco (b), boro (c), manganês (d) e ferro (e), e teores de aminoácidos (g) e carboidratos (h) na parte aérea do capim Mavuno e do capim Zuri sob condição irrigada e sequeiro em condição de campo em Jaboticabal-SP, Brasil. ^{ns}, * e ** corresponde ao teste F não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente. Médias são comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam medias entre as condições hídricas e letras minúsculas comparam os efeitos das espécies. Barras representam o erro padrão da média, n = 4.

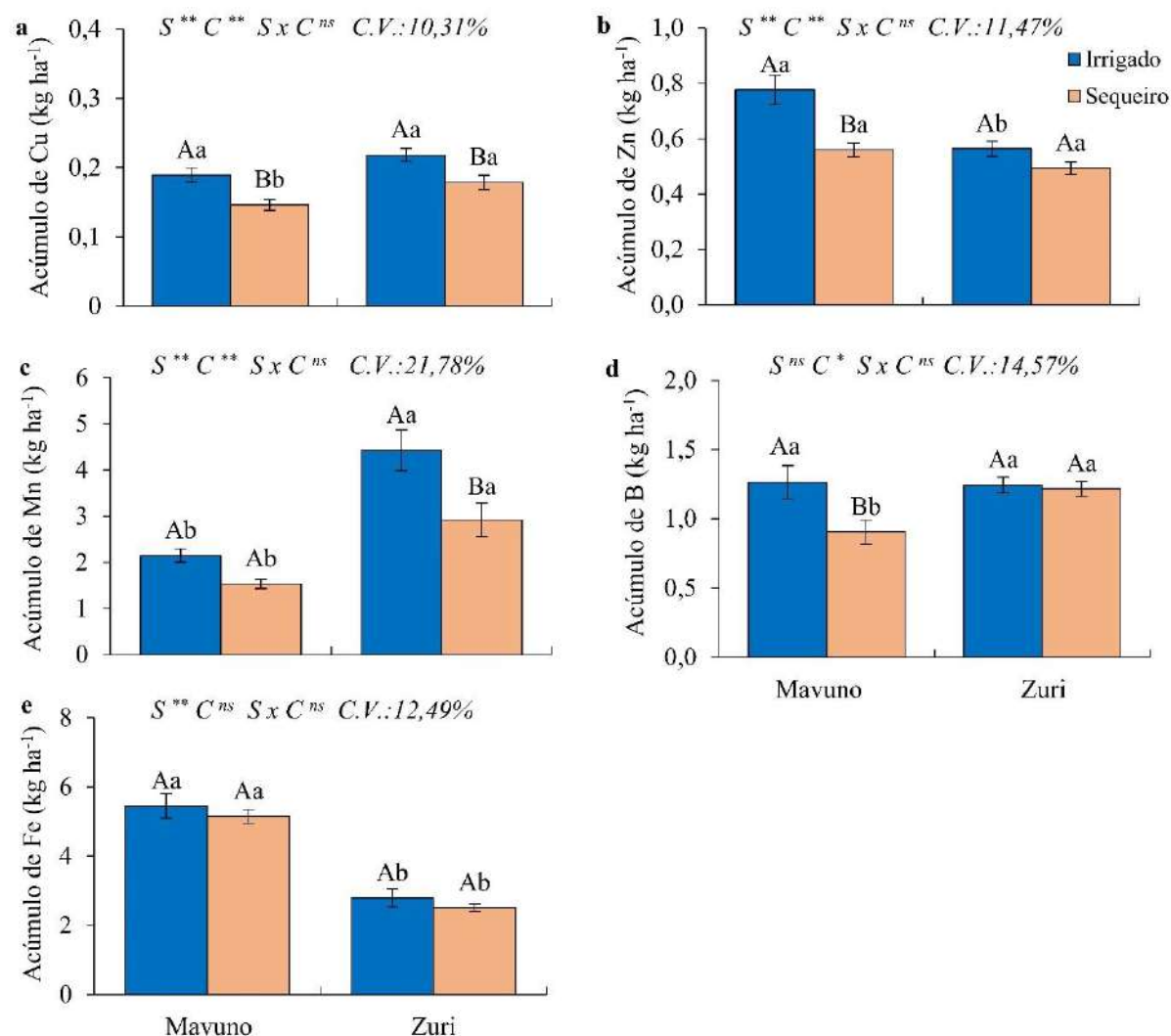


Fig 5 Acúmulos de cobre (a), zinco (b), manganês (c), boro (d) e ferro (e), na parte aérea do capim Mavuno e do capim Zuri sob condição irrigada e sequeiro em condição de campo em Jaboticabal-SP, Brasil. ^{ns}, * e ** corresponde ao teste F não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente. Médias são comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam médias entre as condições hídricas e letras minúsculas comparam os efeitos das espécies. Barras representam o erro padrão da média, n = 4.

3.3 Razões estequiométricas e eficiências de uso de macronutrientes e de água

Não houve interação significativa entre os fatores espécie e condição hídrica para as razões estequiométricas (Fig 6 a-d), mas houve interação entre os fatores (p -valor $< 0,05$) para as eficiências de uso de nutrientes, com exceção da EUMg e EUA (Fig 7 a-g).

Ao observar as razões estequiométricas na condição irrigada em comparação com a não irrigada, notou-se a diminuição nas razões C:P, C:Si, e N:P em ambas espécies, e um aumento na razão C:N em 6% no capim Mavuno (Fig 6 a-d). A irrigação promoveu também o aumento nas eficiências de uso de N, K, S e água no capim Mavuno, e também na eficiência de uso de K no capim Zuri (Fig 7 a-g).

Ao comparar as espécies forrageiras cultivadas sem irrigação, notou-se que o capim Zuri apresentou menores razões C:N (-6%) e C:Si (-29%), e maior razão N:P (+16%) em relação ao capim Mavuno, sem diferença na razão C:P entre as forrageiras. Na condição irrigada houve maiores razões C:P (+13) e N:P (+24%) no capim Zuri, bem como maiores razões C:N (+9%) e C:Si (76%) no capim Mavuno (Fig 6 a-d).

Para as eficiências de uso de nutrientes, observou-se que no cultivo não irrigado o capim Zuri apresentou maiores eficiências de uso de C (+5%), P (+13%) e S (+21%) e de EUA (+35%) em relação ao capim Mavuno, sem diferenças entre as espécies forrageiras para as eficiências de uso de N, K e Mg (Fig 7 b, f). Por outro lado, sob irrigação, foi observado no capim Mavuno maiores eficiências de uso de N (+5%), Ca (+32%) e de Mg (+65%) em comparação com o Zuri. O capim Zuri teve maior EUA (+16%), EUC, EUS, EUP em condição de sequeiro, o mavuno aumentou a EUS e EUA em 19% na condição irrigada.

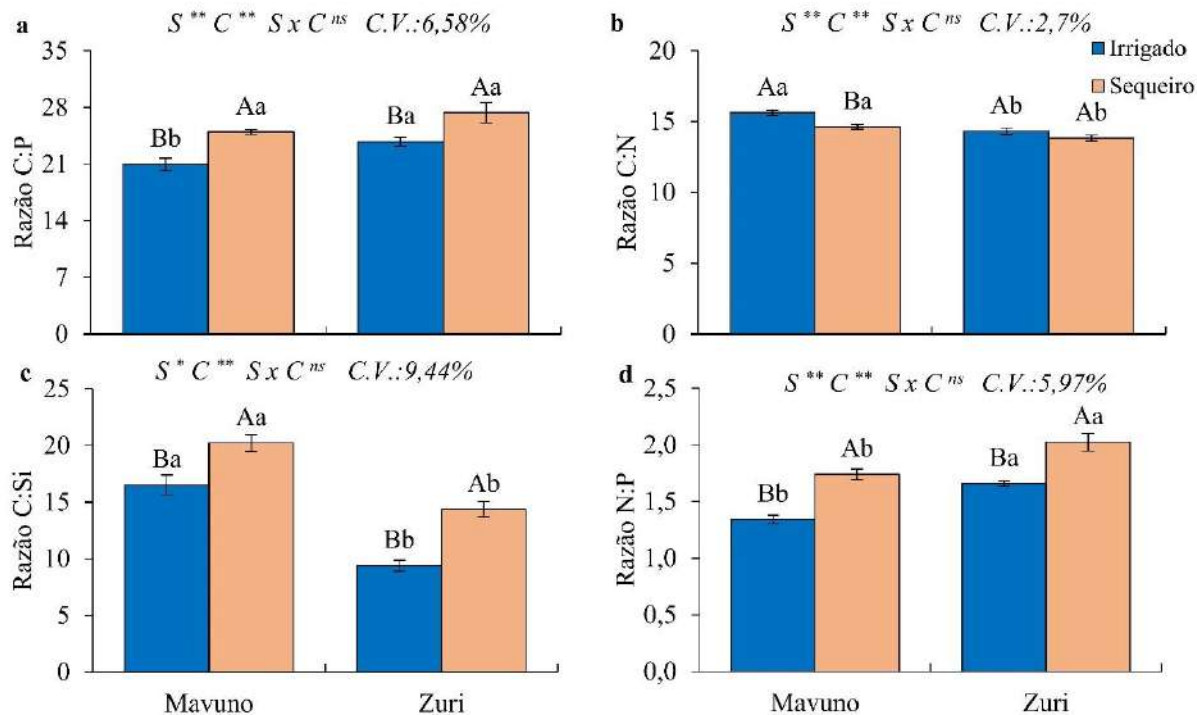


Fig 6 Razões estequiométricas carbono:fósforo (a), carbono:nitrogênio (b), carbono:silício (c) e nitrogênio:fósforo (D), na parte aérea do capim Mavuno e do capim Zuri sob condição irrigada e sequeiro em condição de campo em Jaboticabal-SP, Brasil. ^{ns}, * e ** corresponde ao teste F não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente. Médias são comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam medias entre as condições hídricas e letras minúsculas comparam os efeitos das espécies. Barras representam o erro padrão da média, n = 4.

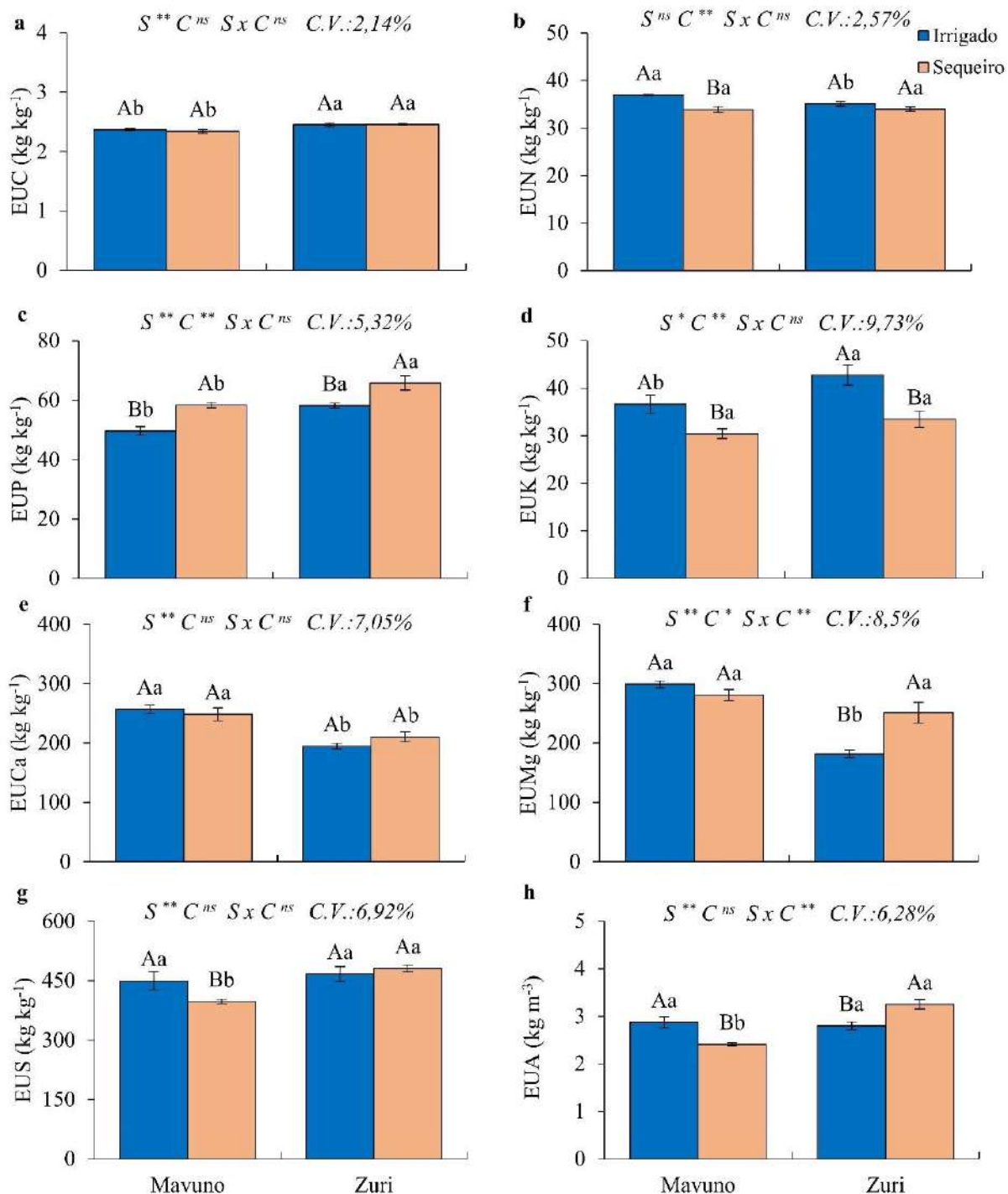


Fig 7 Eficiências de uso de carbono (a), nitrogênio (b), fósforo (c), potássio (d), cálcio (e), magnésio (f), enxofre (g), e água (h), na parte aérea do capim Mavuno e do capim Zuri sob condição irrigada e sequeiro em condição de campo em Jaboticabal-SP, Brasil. ^{ns}, * e ** corresponde ao teste F não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente. Médias são comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam medias entre as condições hídricas e letras minúsculas comparam os efeitos das espécies. Barras representam o erro padrão da média, n = 4.

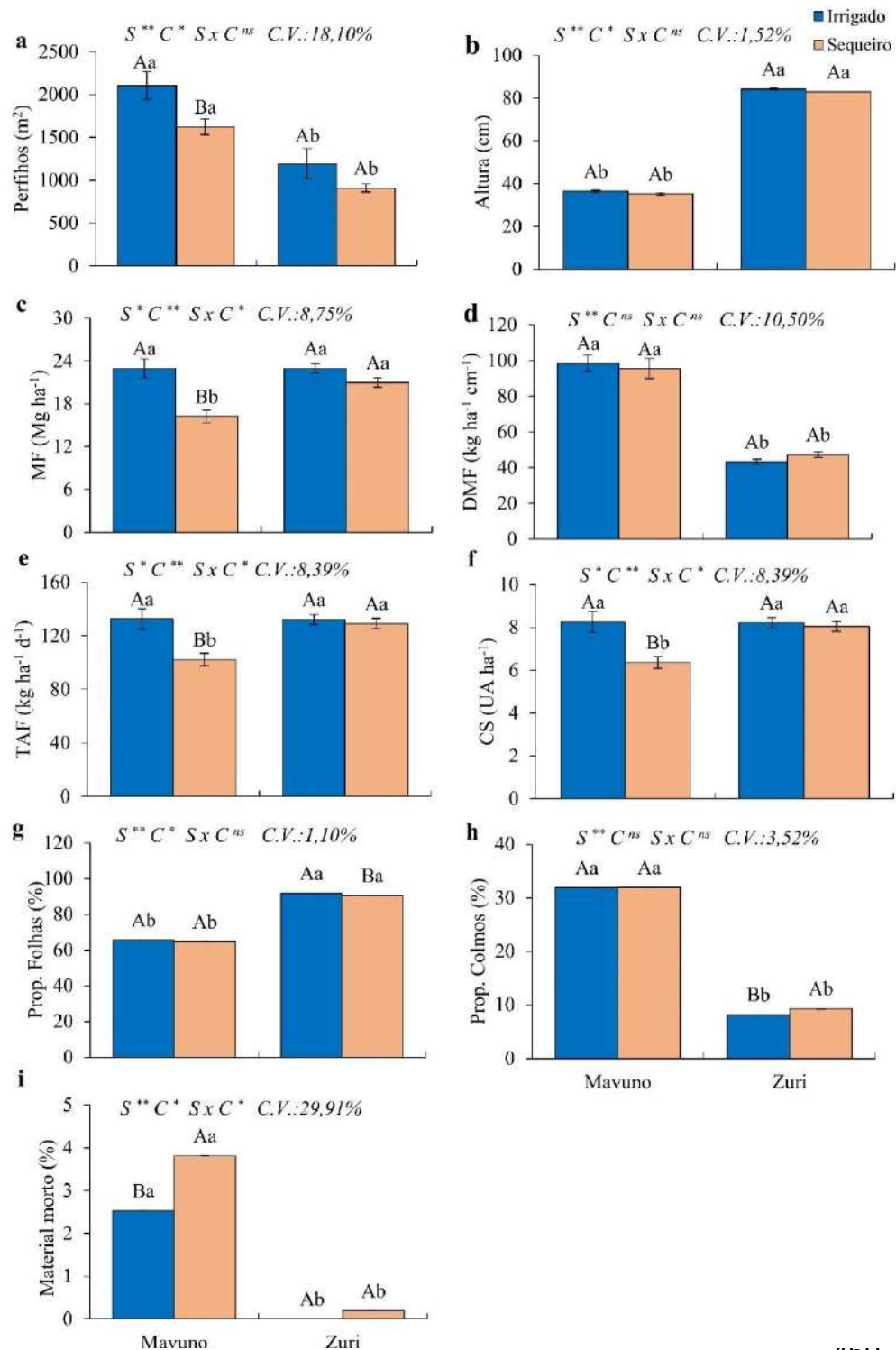
3.4 Parâmetros produtivos e a composição morfológica da massa seca

Os fatores condição hídrica e espécie forrageira apresentaram interação significativa (p -valor < 0,05) para as variáveis massa seca de forragem, taxa de acúmulo de forragem, capacidade de suporte e percentual de material morto na biomassa (Fig 8 a-i).

No cultivo sem irrigação observou-se no capim *M. maximus* cv. Zuri um menor número de perfilhos (-44%), e maiores altura do dossel, produção de massa seca de forragem (+29%), taxa de acúmulo de forragem (+26%) e capacidade de suporte (+26%) em comparação com o capim Mavuno (Fig 8 a-d, f). O capim Mavuno cultivado sem irrigação apresentou maior densidade de massa de forragem em relação ao Zuri (Fig 8 c). Não foi encontrada diferença na produção de MS entre as espécies forrageiras quando cultivadas sob irrigação (Fig 8 c), mas houve no capim Mavuno maior número de perfilhos e densidade (Fig 8 a, e).

Analisando o cultivo irrigado em comparação com o sequeiro, observou-se para o capim Mavuno um aumento no número de perfilhos (+30%), na produção de MF (+41%), na taxa de acúmulo de forragem (+30%), e na capacidade de suporte (+30%), bem como a diminuição no percentual de material morto (-34%) na forragem (Fig 8 a, c, d, f, i). O capim Zuri sob irrigação apresentou aumento no percentual de lâmina foliar e diminuição no percentual de colmo (-14%) na forragem, sem efeito da irrigação nos parâmetros produtivos dessa gramínea (Fig 8 g, h).

Tanto em sequeiro quanto no cultivo irrigado observou-se no capim Mavuno maior número de perfilhos e maior densidade da massa de forragem em relação ao capim Zuri (Fig 8 a, e). Por sua vez o capim Zuri apresentou maior percentual de lâmina foliar (+40%), e menores percentuais de colmo (-73%) e de material morto (-97%) na forragem em comparação com o capim Mavuno (Fig 8 g, i).



459

Fig 8 Número de perfílos vivos (a), altura do dossel (f), massa de forragem (c), densidade da massa de forragem (d), taxa de acúmulo de forragem (e), capacidade de suporte (f), e proporções de folhas (g), colmos (h) e material morto (i) no estrato pastejável do capim Mavuno e do capim Zuri sob condição irrigada e sequeiro em condição de campo em Jaboticabal-SP, Brasil. ^{ns}, * e ** corresponde ao teste F não

significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente. Médias são comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam médias entre as condições hídricas e letras minúsculas comparam os efeitos das espécies. Barras representam o erro padrão da média, $n = 4$.

3.5 Análise de componentes principais

Foram selecionadas apenas variáveis não redundantes estatisticamente (multicolinearidade avaliada pelo índice $NC < 120$), e os autovalores das duas componentes principais extraídos foram maiores que um (01), portanto, elas podem ser agrupadas em modelos que explicam a variação dos dados.

Analisando as condições de cultivo (Fig 9) a CP1 representou 51,3% da variância, sendo que as variáveis que contribuíram positivamente foram o teor de carboidratos, número de perfilhos e as razões C:N e C:Si. Por outro lado, as variáveis correlacionadas negativamente com a CP1 foram o percentual de folhas no estrato pastejável e a razão N:P. A CP 2 representa 27,6% da variação. As variáveis que apresentaram correlações positivas foram o teor de aminoácidos e as razões N:P e C:Si. As variáveis que se correlacionaram de forma negativa com a CP2 foram a massa de forragem e a razão C:N.

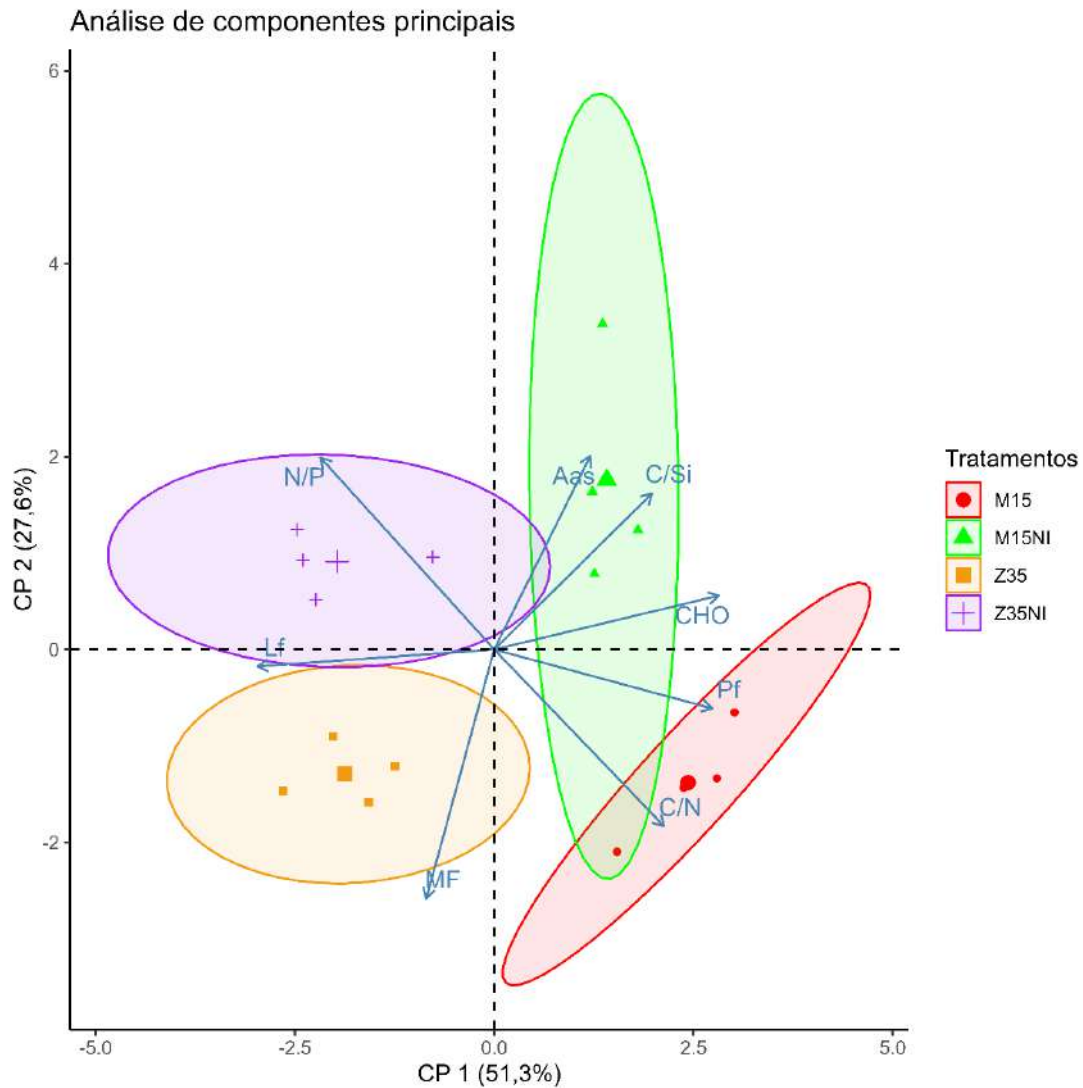


Fig 9 Mapa de vetores e agrupamento hierárquico com base na distância euclidiana na análise de componentes principais para o capim Mavuno e capim Zuri sob condições irrigadas e sequeiro em condição de campo em Jaboticabal-SP, Brasil. Aas: teor de aminoácidos; CHO: teor de carboidratos; MF: massa de forragem, Lf: proporção de folhas, Pf: perfilhos; C/N: razão carbono/nitrogênio, C/Si: razão carbono/silício e N/P: razão nitrogênio/fósforo. M15, Z35, M15NI e Z35NI grupos de tratamentos com base na distância euclidiana.

4 Discussão

4.1 A absorção e o acúmulo de macronutrientes na primavera-verão são influenciados pela condição hídrica e espécie forrageira

Em cada região de cultivo das forrageiras existem padrões de teores de nutrientes foliares que orientam a avaliação do estado nutricional da forrageira. No estado de São Paulo (Brasil) tem-se a indicação de teores adequados de nutrientes para as forrageiras (gêneros *Megathyrsus* e *Urochloa*), para os macronutrientes em g kg⁻¹ (N: 15-25; P:1-3; K:15-30; Ca: 3-8; Mg:1,5-5,0; S:1-3) e micronutrientes em mg kg⁻¹ (B:10-30; Cu:4-14; Fe: 50-200; Mn:40-200; Zn:20-50) (Quaggio et al., 2022). Esses padrões são indicados para uso em cultivos em sequeiro e irrigado, mas existem dúvidas se são válidos para espécies mais responsivas a irrigação, que em geral são as espécies que tem sua produção limitada pelo déficit hídrico, sendo pouco tolerantes a essa restrição.

Observou-se que a irrigação embora tenha modificado os teores foliares para alguns nutrientes como P, K, e S em ambas forrageiras (Fig 2 b, c, d), não modificou a interpretação do estado nutricional da cultura. Por exemplo, a irrigação diminuiu os valores do teor foliar de N no capim Mavuno (28 a 27g kg⁻¹), mas isso não alterou o estado nutricional, pois, supera o padrão indicado para a cultura (15-25g kg⁻¹) e isso se repetiu para os demais nutrientes. Assim, as condições de cultivo irrigado e sequeiro na primavera-verão não alteraram o estado nutricional das gramíneas, pois, não causou deficiências nutricionais. No entanto, a produção da forrageira Mavuno em sequeiro foi limitada pela menor eficiência de uso dos nutrientes no cultivo em sequeiro (Fig 7 a-g).

Portanto, os padrões nutricionais atuais permanecem adequados para avaliação do estado nutricional da forrageira Zuri com ou sem irrigação, e também para a cultivar Mavuno em cultivo irrigado. No entanto, isso não se verifica para a cultivar Mavuno em sequeiro, pois, mesmo com teores considerados adequados e próximos aos da condição irrigada, essa forrageira teve a produção limitada, pela restrição hídrica. Assim, pode ser necessário a atualização dos padrões nutricionais considerando a espécie/cultivar e os sistemas de cultivo irrigado ou sequeiro.

O uso da irrigação pode favorecer a absorção dos nutrientes pelas gramíneas forrageiras, mas há poucos estudos em condições de campo que elucidam seus benefícios na nutrição dessas plantas, especialmente durante períodos de estiagens, ou que apontem quais nutrientes são mais impactados pela irrigação em função da espécie ou cultivar. Isso é importante, pois, a espécie cultivada pode ou não interferir na absorção, por se tratar de um processo governado pelos transportadores de membrana que são alterados pelos fatores genéticos (Prado, 2021). Neste estudo, observou-se que a irrigação promoveu uma maior absorção de P e Mg em ambas as espécies (Fig 2 b, h), o que corrobora com a melhor difusão do fosfato sob ótima disponibilidade de água no solo, e é potencializado pela fertirrigação por gotejamento subterrâneo, que coloca os nutrientes na zona radicular favorecendo sua absorção e acúmulo na biomassa (Melo et al., 2020; Guo et al., 2023).

O cultivo irrigado também favoreceu a absorção de Si (ácido monossilícico, H_4SiO_4) pelas forrageiras Mavuno e Zuri devido à manutenção do fluxo transpiratório das plantas (Ma & Yamaji, 2006). A irrigação pode ter favorecido também a dissolução de fitólitos, que são um importante reservatório de Si no solo (Guntzer et al., 2012), o que é benéfico para as gramíneas por melhorar a eficiência de uso de nutrientes (Silva & Prado, 2021; Melo et al., 2023), e de fato observou-se correlação positiva do teor de Si com as eficiências de uso de Ca ($r=0.92^{**}$), de Mg ($r=0.95^{**}$), e do acúmulo de Si com a eficiência de uso C na condição irrigada ($r=0.64^{**}$).

A espécie *M. maximus* cv Zuri absorveu mais Ca e Si que o capim Mavuno independente da condição hídrica, o que é uma habilidade importante, pois, o Ca influencia a divisão e alongação celular, a sinalização hormonal de estresses e a absorção de outros nutrientes (Abbas et al., 2021; Prado, 2021), enquanto o Si é um elemento antiestresse importante em gramíneas (Rocha et al., 2022). Embora as plantas da família Poaceae são conhecidamente acumuladoras de Si (Ma & Yamaji, 2006), a capacidade superior de *M. maximus* cv. Zuri em absorver e acumular Si em comparação com *U. brizantha* x *U. ruziziensis* cv. Mavuno indica diferenças a nível de espécie dentre as gramíneas, que pode ser objetivo de próximos estudos.

A maior capacidade do capim Zuri em manter o acúmulo de nutrientes como N, C e K em comparação com Mavuno no cultivo em sequeiro (Fig 2 a, g, c), foi uma vantagem importante, visto que esses acúmulos apresentaram alta correlação com a

produção de forragem no cultivo sem irrigação (N: $r = 0.99^{**}$, C: 0.99^{**} ; K: 0.95^{**}). Por outro lado, no cultivo irrigado, embora o Zuri tenha se beneficiado pelo maior acúmulo de P e Si, o capim Mavuno se destacou com aumentos no acúmulo de todos os macronutrientes, indicando maior responsividade de *U. brizantha* x *U. ruziziensis* cv. Mavuno à irrigação.

4.2 Condição hídrica influencia a concentração de micronutrientes e aminoácidos em gramíneas forrageiras

O déficit hídrico prejudica a absorção de nutrientes, especialmente aqueles cujo contato com a raiz ocorre por fluxo de massa ou difusão (Bhattacharya, 2021), mas conforme o presente estudo, os prejuízos às gramíneas forrageiras variam conforme a espécie, visto que *M. maximus* cv. Zuri teve menor absorção de Fe em comparação ao capim Mavuno no cultivo sem irrigação (Fig 5 b, e), enquanto o acúmulo de Cu, Mn e B foi superior no capim Zuri (Fig 5 a, c, d). Esses resultados corroboram com a primeira e a segunda hipóteses deste estudo, pois, o déficit hídrico durante períodos de estiagem pode limitar a absorção de nutrientes, e isso varia conforme a espécie forrageira.

Os benefícios da irrigação se apresentaram ao otimizar os acúmulos de Cu (ambas espécies forrageiras), de Zn e B no capim Mavuno, e de Mn no capim Zuri. Particularmente, notou-se que o capim Zuri apresenta uma capacidade superior de absorver Mn do solo em relação ao capim Mavuno independente da condição hídrica, indicando forte efeito da espécie, o que inclusive tem sido investigado em outras cultivares do gênero *Megathyrsus* (Souza Junior & Monteiro, 2024). Ressalta-se que a diminuição nos teores de Cu e Fe no capim Mavuno sob irrigação deve-se possivelmente a um efeito de diluição, que ocorre pelo incremento na biomassa no cultivo irrigado.

Foi evidenciado que as gramíneas forrageiras podem utilizar o mecanismo do aumento de solutos quando submetidas a restrição hídrica, pois, o capim Zuri priorizou a concentração de aminoácidos na condição de sequeiro, e o capim Mavuno apresentou maior teor de carboidratos totais que o Zuri nessa condição (Fig 4 g, h), confirmando a segunda hipótese testada. Essa concentração de solutos na parte aérea permite que as plantas mantenham a absorção de nutrientes do solo mesmo

sob déficit hídrico, devido à regulação do potencial osmótico, estabilização e menor dano oxidativo às membranas celulares (Kumar et al., 2021; Rodrigues-Corrêa & Fett-Neto, 2019). Similarmente, isso foi observado em *Cynodon dactylon* em ambiente controlado (Carmo-Silva et al., 2009).

4.3 Efeitos da condição hídrica e da espécie na homeostase elementar e eficiência de uso de nutrientes em gramíneas forrageiras na primavera-verão

A homeostase entre C, N e P tem sido uma abordagem útil para compreender como as plantas toleram ou não as restrições impostas pelo sistema de cultivo, devido à importância desse equilíbrio para a produção das plantas (Xu et al., 2024). No presente estudo, foi evidenciado que o déficit hídrico durante estiagens na estação chuvosa compromete a homeostase elementar das gramíneas, à medida em que sua absorção de nutrientes é limitada (Fig 3 a-h), o que até então era conhecido apenas para déficits típicos de estação seca (Oliveira Filho et al., 2021; Teixeira et al., 2022). Nesse contexto, o uso da irrigação no período primavera-verão beneficiou a homeostase C:N:P ao diminuir as razões C:P, N:P e C:Si tanto no capim Mavuno quanto no capim Zuri, devido à absorção otimizada de P e Si em ambas espécies.

A flexibilidade estequiométrica é importante para a tolerância a seca em algumas gramíneas forrageiras (Mariotte et al., 2017), e de fato tanto o capim Mavuno quanto o Zuri apresentaram mudanças na estequiometria N:P sob cultivo em sequeiro em relação ao irrigado. Isso confirma essa estratégia diante da restrição hídrica para essas espécies, e foram observadas altas correlações positivas entre a razão N:P e a eficiência de uso de nutrientes como Ca ($r = 0.91^{**}$), P ($r=0.91^{**}$) e S ($r=0.87^{**}$) no cultivo sem irrigação. Porém, esse mecanismo não impediu a diminuição do potencial produtivo do capim Mavuno, indicando sua maior sensibilidade à perda do equilíbrio C:N:P em relação ao Zuri.

O capim Mavuno apresentou importantes melhoras na homeostase elementar sob irrigação, com aumento nas razões C:N e diminuição da C:Si, devido a diminuição do teor de N e aumento do teor de Si em comparação com o cultivo em sequeiro. Isso se soma com o incremento no acúmulo de C e melhoria nas eficiências de uso de C, N, P e demais macronutrientes (Fig 7 a-g), consolidando a responsividade de *U. brizantha* x *U. ruziziensis* cv. Mavuno à irrigação. Além disso, o acúmulo de C e a

razão C:N apresentaram, respectivamente, alta relação positiva com a eficiência de uso de N ($r=0.94^{**}$), e de Mg ($r=0.95^{**}$).

Foi constatado que o capim Zuri apresentou maior EUA, menores razões C:N e C:Si independente da condição hídrica de cultivo, o que se relaciona com seu menor teor de C em comparação ao Mavuno. Isso remete a uma possível diminuição do C relativo devido à maior incorporação do Si nas estruturas de C da planta, processo de menor custo energético para a planta do que a síntese de lignina por exemplo, resultando em saldo de energia (Raven 1983; Hodgson & Guppy, 2022). Esse mecanismo foi descrito em gramíneas sob déficit hídrico severo (Teixeira et al., 2022; Costa et al., 2023), e agora ficou evidenciado que contribui para a tolerância ao déficit hídrico imposto por períodos de estiagem no capim Zuri, permitindo acúmulo de C superior ao observado no capim Mavuno nessa condição (Fig 7 h).

As modificações na estequiometria elementar pela incorporação de Si têm sido frequentemente relacionadas com a melhor eficiência da planta em converter os nutrientes em massa seca (Melo et al., 2023; Oliveira Filho et al., 2021; Rocha et al., 2021). Isso se verificou no cultivo sem irrigação para o capim Zuri, que apresentou maiores mudanças na estequiometria C:N:P:Si, e se destacou pelas maiores eficiências de uso de C, P, S e da água em relação ao capim Mavuno, corroborando com a segunda hipótese testada. As razões C:P e N:P se correlacionaram positivamente com as eficiências de uso de Mg ($r=0.97^{**}$; $r=0.94^{**}$), de K ($r=0.69^{**}$; $r=0.72^{**}$), e de C ($r=0.81^{**}$; $r=0.83$).

4.4 Cultivo em sequeiro e irrigado na produção e composição morfológica da forragem na primavera-verão

A produção de forragem em diversas regiões do mundo é limitada pela ocorrência de períodos de déficit hídrico na época seca do ano. Porém, conforme este estudo, a restrição hídrica causada por curtos períodos na estação das chuvas pode diminuir o potencial produtivo de espécies forrageiras sensíveis. Foi observado que no cultivo sem irrigação, sob ocorrência de estiagem o capim Mavuno teve sua produção 29% menor que a do capim Zuri, mesmo apresentando maior número de perfilhos (Fig 8 a, c). Essa maior tolerância do Zuri é explicada pela superior

capacidade de acúmulo e de eficiência de uso de C e nutrientes como o N, elemento fundamental no perfilhamento das gramíneas (Almeida et al., 2022), e o K que é requerido na ativação enzimática atuando na síntese de proteína e na fotossíntese (Hawkesford, 2023).

A eficiência de uso dos nutrientes reflete a capacidade da planta em convertê-los em MS, e esse processo é influenciado pela condição hídrica e pela espécie cultivada. Neste estudo, as eficiências de uso de C, N, P, K e de S, apresentaram alta correlação com o percentual de lâmina foliar ($r=0.96^{**}$; $r=0.96^{**}$; $r=0.90^{**}$; $r=0.94^{**}$, e $r=0.90^{**}$, respectivamente), que por sua vez tem relação com a produção de forragem ($r=0.97^{**}$). Além disso, a maior altura do dossel do capim Zuri também contribui para a maior taxa de acúmulo e consequentemente para a produção de forragem ($r=0.96^{**}$), superando o efeito da menor densidade em relação ao capim Mavuno, relações bem conhecidos na ecofisiologia de plantas forrageiras (Dias et al., 2021; Kunrath et al., 2020).

Com a irrigação houve notável incremento na taxa de acúmulo de forragem no capim Mavuno (29,4%) em relação ao seu cultivo em sequeiro, elevando a produção de forragem em 41%, equivalente a 6.703 kg ha^{-1} de MS. Esse ganho na produção resulta em última instância do maior número de perfilhos nessa condição (Fig 8 a), que apresentou correlação positiva com a taxa de acúmulo de forragem ($r=0.94^{**}$).

O número de perfilhos na condição irrigada foi relacionado principalmente com os teores de Fe ($r=0.96^{**}$), Zn (0.96^{**}) e Si ($r=0.96^{**}$), bem como as eficiências de uso de Mg ($=0.90^{**}$) e de Ca ($r=0.86^{**}$), mas houve também no capim Mavuno um acúmulo otimizado P sob irrigação, nutriente chave para o perfilhamento e para a fotossíntese (Martins et al., 2015; Prado, 2021). Com maior produção, a capacidade de suporte do pasto aumentou em 2 UA ha^{-1} (Fig 8 f), ficando claro o potencial de uso da irrigação no capim Mavuno na primavera-verão diante da variabilidade das chuvas, bem como o potencial dessa forrageira para sistemas intensivos irrigados, corroborando com a terceira hipótese testada.

A composição morfológica da massa seca em ambas forrageiras foi melhorada com a irrigação, com menos material morto (-33%) e colmo (-12%) na forragem dos capins Mavuno e Zuri, respectivamente, e aumento na fração lâmina foliar do capim Zuri. Isso favorece o consumo e o desempenho de animais em pastejo, que tem

preferência por folhas verdes com maior valor nutricional do que as frações colmo e material morto (Moore et al., 2020), um benefício importante da irrigação verificado para ambas espécies forrageiras.

5 Conclusões

A restrição hídrica imposta às gramíneas forrageiras pela estiagem no período primavera-verão prejudica a absorção e acúmulo de nutrientes, alterando o equilíbrio entre C:N:P nos capins Zuri e Mavuno.

M. maximus cv. Zuri foi mais tolerante ao déficit hídrico utilizando mecanismos como acúmulo de aminoácidos, modificações na homeostase C:N:P:Si e manutenção da eficiência de uso de C e nutrientes minerais em condição de sequeiro.

A irrigação mitigou os prejuízos nutricionais causados pelo déficit hídrico no capim *U. brizantha* x *U. ruziziensis* cv. Mavuno, aumentando sua produção de forragem em 41% na primavera-verão ao melhorar as eficiências de uso de nutrientes e o perfilhamento. A composição morfológica da forragem foi melhorada no cultivo irrigado para ambas espécies forrageiras.

6 Referências

- Abbas M, Hashim A, Mohamed S, 2021. Ameliorative effects of calcium sprays on yield and grain nutritional composition of maize (*Zea mays* L.) cultivars under drought stress. **Agriculture**. 11, 285. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040285>.
- Almeida EM, Montagner DB, Difante GS, Araújo AR, Santana JCS, Gurgel ALC, Scariot C, 2022. Growth dynamics and nutrient uptake of *Panicum maximum* under nitrogen fertilisation. **N. Z. J. Agric. Res.** 66, 244–258. <https://doi.org/10.1080/00288233.2022.2057554>
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JDM, Sparovek G, 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol. Z.** 22, 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Andrioli, I, Centurion, JF, 1999. Detailed survey of the soils of the Faculty of Agricultural and Veterinary Sciences of Jaboticabal. **Proceedings Brazilian Congress of Soil Science**. 32p. <https://www.fcav.unesp.br/#!/departamentos/solos-e-adubos/informacoes-adicionais/mapa-de-solos-da-fcav/> (accessed 26 August 2024).
- Arslan B, Büyükcangaz H, Kumraltekin ED, Yönter F, Candoğan BN, Kuşçu H, Bilgili U, 2024. Effects of full and deficit irrigation on the growth and quality of cool-season turfgrasses under subsurface drip irrigation. **Sci. Hortic.** 325, 112685. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112685>.
- Bahmani I, Thom ER, Matthew C, Hooper RJ, Lemaire G, 2003. Tiller dynamics of perennial ryegrass cultivars derived from different New Zealand ecotypes: effects of cultivar, season, nitrogen fertiliser, and irrigation. **Aust. J. Agric. Res.** 54, 803-817. <https://doi.org/10.1071/AR02135>.
- Barbosa PL, Silva VJ, Pedreira CG, Sbrissia AF, Sollenberger LE, 2021. Herbage accumulation and tillering dynamics of 'Zuri' guineagrass under rotational stocking. **Crop. Sci.** 61, 3787-3798. <https://doi.org/10.1002/csc2.20536>.
- Bartlett MS, 1937. **Properties of sufficiency and statistical tests**. Proc. R. Soc. Lond. 160, 268–282. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109>.
- Bhattacharya, A, 2021. Mineral nutrition of plants under soil water deficit condition: a review. In: **Soil water deficit and physiological issues in plants**. Springer, Singapore. pp 287–391. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6276-5_4
- Bataglia, OC., Furlani, AMC., Teixeira, JPF., Furlani, PR., Gallo, JR, 1983. **Métodos de análise química de plantas**. Boletim Técnico 78. Instituto Agronômico, Campinas. 31p.
- Bernardo, S, Mantovani, EC, Silva, DD, Soares, AA. (2019). **Manual de irrigação** 9º ed. Viçosa, MG: UFV, 545p.

Bhardwaj S, Kapoor D, 2021. Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. **Plant Physiol. Biochem.** 166, 1044-1053. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.005>.

Carmo-Silva AE, Francisco A, Powers SJ, Keys AJ, Ascensão L, Parry MAJ, Arrabaça MC, 2009. Grasses of different C4 subtypes reveal leaf traits related to drought tolerance in their natural habitats: changes in structure, water potential, and amino acid content. **Am. J. Bot.** 96, 1222-1235. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800224>.

Cardoso JA, Pineda M, Jiménez JC, Vergara MF, Rao IM, 2015. Contrasting strategies to cope with drought conditions by two tropical forage C4 grasses. **AoB Plants.** 7, 107. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv107>.

Carvalho AMX, Mendes FQ, Mendes FQ, Tavares LDF, 2020. SPEED Stat: A free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. **Crop Breed. Appl. Biotechnol.** 20. <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3s46>.

Carvalho CAB, Silva SC, Sbrissia AF, Pinto LFM, Carnevali RA, Fagundes JL, Pedreira CGS, 2000. Tiller demography and dry matter accumulation rates in 'Tifton 85' swards under grazing. **Sci. Agric.** 57, 591- 600. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000400001>.

Costa MG, Prado RM, Sarah MMS, Palaretti LF, Piccolo MC, Souza Júnior JP, 2023. New approaches to the effects of Si on sugarcane ratoon under irrigation in Quartzipsamments, Eutrophic Red Oxisol, and Dystrophic Red Oxisol. **BMC Plant Biol**, 23, 51. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04077-2>.

Davis, H, Magistrali A, Butler G, Stergiadis S, 2022. Nutritional benefits from fatty acids in organic and grass-fed beef. **Foods.** 11, 646. <https://doi.org/10.3390/foods11050646>

Dejene T, Dalle G, Woldeamanuel T, Woldeamanuel T, Mekuyie M, 2023. Temporal climate conditions and spatial drought patterns across rangelands in pastoral areas of West Guji and Borana zones, Southern Ethiopia. **Pastoralism.** 13, 18. <https://doi.org/10.1186/s13570-023-00278-4>

Dias MBC, Costa KAP, Severiano EC, Bilego UO, Vilela L, Souza WF, Silva ACG, 2021. Cattle performance with *Brachiaria* and *Panicum maximum* forages in an integrated crop-livestock system. **Afr. J. Range Forage Sci.** 39, 230-243. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1901311>.

Dourado-Neto D, Lier QDJ, Metselaar K, Reichardt K., Nielsen DR, 2010. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Sci Agric**, 67:87-95. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000100013>

Dubeux Jr JCB, Sollenberger LE, Mathews BW, Scholberg JM, Santos HQ, 2007. Nutrient cycling in warm-climate grasslands. **Crop Science.** 47, 915-928. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.09.0581>

DuBois, M, Gilles, KA, Hamilton, JK, Rebers, PA, Smith F, 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. **Analytical Chemistry**. 28 (3), 350-356. DOI: 10.1021/ac60111a017.

Elser JJ, Fagan WF, Kerkhoff AJ, Swenson NG, Enquist BJ, 2010. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change. **New Phytol.** 186, 593-608. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03214.x>.

Embrapa Beef Cattle, 2014. **BRS Zuri, produção e resistência para a pecuária**. <https://www.embrapa.br/documents/1355008/1528459/Folder+Zuri.pdf/e89a784d-fe75-47ff-8a79-6065f85b8fb5> (accessed 13 August 2024).

Guo Y, Wang Z, Li J, 2023. Coupling effects of phosphate fertilizer type and drip fertigation strategy on soil nutrient distribution, maize yield and nutrient uptake. **Agric. Water Manag.** 290:108602. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108602>.

Guenni O, Marín D, Baruch Z, 2002. Responses to drought of five *Brachiaria* species. I. Biomass production, leaf growth, root distribution, water use and forage quality. **Plant Soil**. 243, 229-241. <https://doi.org/10.1023/A:1019956719475>

Guntzer F, Keller C, Meunier JD, 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agron Sustain. Dev.** 32, 201-213. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>

Habermann E, Oliveira EAD, Contin DR, Delvecchio G, Viciado DO, Moraes MA, Martinez CA, 2019. Warming and water deficit impact leaf photosynthesis and decrease forage quality and digestibility of a C4 tropical grass. **Physiol Plant**. 165, 383–402.

Hawkesford, MJ., Cakmak, I, Coskun, D, Kok, LJ, Lambers, H, Schjoerring, JK, White, PJ, 2023. Functions of macronutrients. In: Marschner P (Ed.), *Marschner's mineral nutrition of plants*. **Academic press**. pp. 201-281. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00019-8>

Hodgson MJ, Guppy CN, 2022. Some thoughts on silicon and carbon trade-offs in plants. **Plant Soil**, 477, 233-239. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05394-5>.

Jank L, Barrios SC, Valle CB, Simeão RM, Alves GF, 2014. The value of improved pastures to Brazilian beef production. **Crop Pasture Sci.** 65, 1132-1137. <https://doi.org/10.1071/CP13319>.

Jarque CM, Bera AK, 1980. Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. **Econ. Lett.** 6, 255-259. [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(80\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0165-1765(80)90024-5).

Jayasinghe, JMP, Pembleton, KG, Donaghy, DJ, Ramilan, T, Barber, DG, 2024. Long-term evaluation of pasture production, seasonality, and variability: an application of the DairyMod pasture model for three tropical species. **Eur. J. Agron.** 156, 127103. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127103>.

Jesus FLF, Sanches AC, Souza DP, Mendonça FC, Gomes EP, Santos RC, Silva JLB, 2021. Seasonality of biomass production of irrigated Mombaça 'Guinea grass'. **Acta agric. Scand. B Soil Plant Sci.** 71, 156-164. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1863456>.

Klute A. 1986. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A (Ed). **Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods**. Second edition, p.635-662. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>.

Korndörfer, GH, Pereira, HS, Nolla, A, 2004. **Análise de silício no solo, planta e fertilizantes**. 2ª ed. UFU: Uberlândia, Brasil, 2004.

Kraska JE, Breitenbeck GA, 2010. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Com. Soil Sci. Plant Anal.** 4, 2075-2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>.

Kumar M, Patel MK, Kumar N, Bajpai AB, Siddique KH, 2021. Metabolomics and molecular approaches reveal drought stress tolerance in plants. **Int. J. Mol. Sci.** 22, 9108. <https://doi.org/10.3390/ijms22179108>.

Kunrath TR, Nunes PAA, Souza Filho W, Cadenazzi M, Bremm C, Martins AP, Carvalho PCF, 2020. Sward height determines pasture production and animal performance in long-term soybean-beef cattle integrated system. **Agric. Syst.** 177, 102716. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102716>.

Leal VN, Santos DDC, Paim TDP, Santos LPD, Alves EM, Claudio FL, Salviano PAP, 2023. Economic results of forage species choice in crop-livestock integrated systems. **Agriculture**. 13, 637. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030637>.

Ma JF, Yamaji N, 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends Plant. Sci.** 11, 392-7. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>.

Marcelino KRA, Nascimento Jr DD, Silva SC, Euclides VP, Fonseca DM, 2006. Morphogenetic and structural traits and herbage production of marandugrass under intensities and frequencies of defoliation. **Rev Bras Zootec.** 35, 2243-52. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000800007>.

Mariotte P, Canarini A, Dijkstra FA, 2017. Stoichiometric N: P flexibility and mycorrhizal symbiosis favour plant resistance against drought. **J. Ecol.** 105, 958-967. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12731>.

Martins LE, Monteiro FA, Pedreira BC, 2015. Photosynthesis and leaf area of *Brachiaria brizantha* in response to phosphorus and zinc nutrition. **J. Plant Nutr.** 38, 754-767. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.939758>.

Mattos RF, Matuo CM, Herling VR, Tech ARB, Pereira LET 2023. Canopy leaf area and leaf mass in the upper stratum of *Urochloa* hybrid 'Mavuno'grass subjected to nitrogen fertilisation. **Grass For. Sci.** 78, 359-375. <https://doi.org/10.1111/gfs.12614>.

Matovu J, Alçiçek A, 2023. Feed resources used for small ruminant nutrition in Sub-Saharan Africa: a case study of Uganda. **Trop. Anim. Health Prod.** 55, 377. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03781-3>.

Meisser M, Vitra A, Deleglise C, Dubois S, Probo M, Mosimann E, Mariotte P, 2019. Nutrient limitations induced by drought affect forage N and P differently in two permanent grasslands. **Agric. Ecosyst. Environ.** 280, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.027>.

Melo CCF, Amaral DS, Prado RM, Zanine AM, Ferreira DJ, Piccolo MC., 2023. Nanosilica modulates C:N:P stoichiometry attenuating phosphorus toxicity more than deficiency in *Megathyrsus maximus* cultivated in an Oxisol and Entisol. **Sci. Rep.** 10284. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37504-3>.

Melo MC, Guimarães LM, Silva PL, Camargo DD, Drumond LCD, 2020. Growth and productivity of *Brachiaria* fertilized and irrigated by subsuperficial dripping. **Irriga**, 25, 112-130. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2020v25n1p112-130>

Moore KJ, Lenssen AW, Fales SL, 2020. Factors affecting forage quality. In: Moore KJ, Collins CM, Nelson J, Redfearn DD (Eds). **Forages: The science of grassland agriculture**. John Wiley & Sons Ltd., pp.701-717. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch39>.

Mulet JM, Porcel R, Yenush L, 2023. Modulation of potassium transport to increase abiotic stress tolerance in plants. **J. Exp. Bot.** 74, 5989-6005. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad333>.

Nelson, CJ, Moore, KJ, 2020. Grass Morphology. In: Moore, KJ, Collins, M, Nelson, CJ (Eds.), **Forages: The science of grassland agriculture**. John Wiley & Sons Ltd. Published, Nova Jersey, pp. 23-49.

Oliveira Filho ASB, Prado RM, Teixeira GCM, Piccolo MC, Rocha MAS, 2021. Water deficit modifies C: N: P stoichiometry affecting sugarcane and energy cane yield and its relationships with silicon supply. **Sci. Rep.** 11, 20916. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00441-0>.

Olivera-Viciedo D, Prado RM, Martinez CA, Habermann E, Branco RBF, Piccolo MC, Lata Tenesaca LF, 2021. Water stress and warming impact nutrient use efficiency of Mombasa grass (*Megathyrsus maximus*) in tropical conditions. **J. Agron. Crop Sci.** 207, 128-138. <https://doi.org/10.1111/jac.12452>.

Prado, RM, 2021. Mineral Nutrition of Tropical Plants. 339p. Springer Nature.

Qu Z, Chen Q, Yin S, Feng H, Liu Y, Li C, 2024. Effects of drip irrigation coupled with controlled release potassium fertilizer on maize growth and soil properties. **Agric. Water Manag.** 301, 108948. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108948>.

Quaggio, JA, Alcântara, PB, Cantarella, H, Paulino, VT, Villa, MR, 2022. Forrageiras, In: Cantarella, H, Mattos Jr, D, Boaretto, RM, Quaggio, JA, Van Raij, B. (Eds). **Boletim 100 - Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. Instituto Agrônomo de Campinas, São Paulo.

Raij, B. van., Andrade, JC., Cantarella, H., Quaggio, JA, 2001. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, 285p. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108948>.

Raven JA, 1983. The transport and function of silicon in plants. **Biol. Rev.** 58, 179–207. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1983.tb00385.x>.

Rocha JR, Prado RM, Teixeira GCM, Oliveira Filho ASB, 2021. Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **J. Agron. Crop Sci.** 207, 631-643. <https://doi.org/10.1111/jac.12479>

Rocha, JR, Prado, RM, Piccolo, MC, 2022. New outcomes on how silicon enables the cultivation of *Panicum maximum* in soil with water restriction. **Sci. Rep.** 12, 1897. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05927-z>.

Rodrigues-Corrêa KCS, Fett-Neto AG, 2019. Abiotic stresses and non-protein amino acids in plants. **Crit. Rev. Plant Sci.** 38, 411-430. <https://doi.org/10.1080/07352689.2019.1707944>.

Santos ML, Santos PM, Barioni LG, Pereira BH, Cuadra SV, Pequeno DNL, Sollenberger L, 2024. Yield gap analysis framework applied to pasture-based livestock systems in Central Brazil. **Field Crops Res.** 314, 109416. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109416>.

Siddiqi, MY, & Glass, ADM. (1981). Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, 4(3), 289–302. <https://doi.org/10.1080/01904168109362919>.

Silva EAD, Silva WJD, Barreto AC, Oliveira Junior ABD, Paes JMV, Ruas JRM, Queiroz DS, 2012. Dry matter yield, thermal sum and base temperatures in irrigated tropical forage plants. **Rev. Bras. Zootec.** 41, 574-582. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000300014>.

Silva JLF, Prado RM, 2021. Elucidating the action mechanisms of silicon in the mitigation of phosphorus deficiency and enhancement of its response in sorghum plants. **J. Plant Nutr.** 44, 2572-2582. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1918155>

Silva HMS, Vendramini JM, Oliveira FCL, Soares Filho CV, Kaneko M, Silveira ML, Yarborough JK, 2020. Harvest frequency effects on herbage characteristics of 'Mavuno'brachiariagrass. **Crop Sci.** 60, 1113-1122. <https://doi.org/10.1002/csc2.20046>.

Souza Junior C, Monteiro FA, 2024. Nitrate fertilization enhances manganese phytoextraction in Tanzania guinea grass: a novel hyperaccumulator plant?. **Environ. Sci. Pollut. Res.** 31, 9661–9670. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31548-8>

Souza RTA, Santos MVF, Cunha MV, Gonçalves GD, Silva VJ, Mello ACL, Muir JP, Ribeiro, REP, Dubeux Jr JCB, 2021. Dwarf and tall elephantgrass genotypes under irrigation as forage sources for ruminants: herbage accumulation and nutritive value. **Animals**. 11, 2392. <https://doi.org/10.3390/ani11082392>.

Taiz L, Zeiger E, Møller IM, Murphy A, 2015. Plant Physiology and Development, 6th edition. Sinauer Associates Incorporated. Sunderland, Massachusetts.

Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweis SJ, 1995. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Boletim técnico 5. Departamento de Solos UFRGS, Porto Alegre. 174p.

Teixeira GCM, Prado RM, Rocha AMS, Piccolo MC, 2022. Silicon as a sustainable option to increase biomass with less water by inducing carbon: nitrogen: phosphorus stoichiometric homeostasis in sugarcane and energy cane. **Front. Plant Sci**. 13, 826512. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826512>.

Tejera-Nieves, M., Abraha, M., Chen, J., Hamilton, SK., Robertson, GP., Walker, BJ, 2023. Seasonal decline in leaf photosynthesis in perennial switchgrass explained by sink limitations and water deficit. **Front. Plant Sci**. 13, 1023571. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1023571>.

Thomas H, 1991. Accumulation and consumption of solutes in swards of *Lolium perenne* during drought and after rewatering. **New Phytol**. 11, 35-48. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb00563.x>.

Wolf Seeds, 2024. **Mavuno grass**. <https://www.wolfsementes.com.br/hibrido-mavuno/> (accessed 13 August 2024).

Xu H, Qu Q, Yang J, Wang Z, Wang M, Liu R, Xue S, 2024. Impact of drought on terrestrial ecosystem CNP stoichiometry and microbial nutrient limitation. **Soil Tillage Res**. 236, 105951. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105951>.

Yemm EW, Cocking EC, Ricketts RE, 1955. **The determination of amino-acids with ninhydrin**. Analyst. 80, 209-214. <https://doi.org/10.1039/AN9558000209>.

Yu Q, Elser JJ, He N, Wu H, Chen Q, Zhang G, Han X, 2011. Stoichiometric homeostasis of vascular plants in the Inner Mongolia grassland. **Oecologia** 166, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00442-010-1902-z>.

Zulfiqar F, Ashraf M, 2023. Proline Alleviates Abiotic Stress Induced Oxidative Stress in Plants. **J Plant Growth Regul**. 42, 4629–4651. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10839-3>.

CAPÍTULO 3 – Mitigando os impactos da estiagem na morfogênese, produção e qualidade da forragem de gramíneas com a irrigação por gotejamento

RESUMO - Períodos de estiagem durante a estação chuvosa são cada vez mais frequentes, mas seus impactos nas pastagens e as estratégias de tolerâncias das gramíneas tropicais são desconhecidos em condição de campo. Há ainda a necessidade de esclarecer o potencial de uso da irrigação frente à estiagem e a resposta das gramíneas a essa prática. Este estudo investigou as estratégias morfogênicas e estruturais das gramíneas Mavuno e Zuri para lidar com a estiagem durante a primavera-verão, e seus impactos na produção, composição e digestibilidade da forragem, e analisou-se a resposta das forrageiras à irrigação por gotejamento subterrâneo. A pesquisa foi desenvolvida com um experimento de campo em um fatorial 2 x 2, combinando duas condições hídricas de cultivo (sequeiro e irrigado) e duas gramíneas forrageiras (Mavuno e Zuri) em 4 blocos casualizados. A estiagem alterou a dinâmica de crescimento das forrageiras, com estratégia de alongamento e duração de vida foliar no capim Zuri, e o surgimento de folhas e perfilhos no capim Mavuno, com maior tolerância do capim Zuri à estiagem produzindo 29% a mais que o capim Mavuno. O capim Mavuno foi mais responsivo à irrigação, incrementando seu perfilhamento e digestibilidade da forragem. A irrigação aumentou a produção de proteína e encurtou o período de rebrota dos pastos de ambas forrageiras. As gramíneas Mavuno e Zuri apresentaram produção de forragem e capacidade de suporte similares na condição irrigada, próximas de 23 t ha⁻¹ de MS e 8 UA ha⁻¹, respectivamente. O capim Zuri é mais tolerante à estiagem, enquanto o capim Mavuno responde melhor à irrigação, apresentando maior digestibilidade e energia, com benefícios da irrigação para ambas as forrageiras.

Palavras-chave: composição da forragem; déficit hídrico; gotejamento subterrâneo; *Megathyrsus maximus*; pastagem em sequeiro; *Urochloa spp*

Mitigating the impacts of drought on the morphogenesis, production, and quality of forage grasses through drip irrigation

ABSTRACT - Drought periods during the rainy season are becoming increasingly frequent, yet their impacts on pastures and the strategies employed by tropical grasses remain unclear under field conditions. Furthermore, it is essential to clarify the potential of irrigation in mitigating drought effects and to understand how grasses respond to this practice. This study investigated the morphogenetic and structural strategies of the grasses Mavuno and Zuri in coping with drought during the spring-summer season. It focused on the impacts of drought on forage production, composition, and digestibility, while also analyzing the response of both forage types to subsurface drip irrigation. The research was conducted through a field experiment designed as a 2 x 2 factorial, combining two water management conditions (rainfed and irrigated) with two forage grasses (Mavuno and Zuri). Drought significantly altered the growth dynamics of the forages. The Zuri grass exhibited strategies of leaf elongation and increased leaf longevity, while the Mavuno grass demonstrated leaf and tiller emergence. Zuri displayed greater drought tolerance, producing 29% more biomass than Mavuno. Conversely, Mavuno responded more positively to irrigation, which enhanced its tillering capacity and forage digestibility. Irrigation not only increased protein production but also shortened the regrowth period for both forage types. Under irrigated conditions, both Mavuno and Zuri grasses showed similar forage production and carrying capacity, approximately 23 t ha⁻¹ of dry matter and 8 animal units ha⁻¹, respectively. While Zuri grass demonstrated superior drought tolerance, Mavuno grass exhibited a better response to irrigation, with higher digestibility and energy content. Overall, irrigation provided significant benefits for both forage types.

Keywords: forage composition; *Megathyrsus maximus*; subsurface drip irrigation; *Urochloa spp*; water deficit; rainfed pasture

1 Introdução

A disponibilidade hídrica é um dos pilares da produção de forragem no mundo, influenciando diretamente na produção animal a pasto, uma atividade central em diversas economias no mundo (Jayasinghe et al., 2024; Greenwood, 2022). A base da pecuária a pasto é o cultivo de espécies forrageiras de alta produção de biomassa por hectare, como as gramíneas dos gêneros *Megathyrsus* ssp. e *Urochloa* spp., adaptadas a regiões tropicais e ao cultivo em sistemas intensivos e irrigados, com destaque para materiais genéticos mais recentes como os capins Mavuno (*U. brizantha* x *U. ruziziensis*) e Zuri (*M. maximus*) (Pereira et al., 2021; Almeida et al., 2023).

Um cenário já conhecido das regiões em que se pratica a pecuária a pasto é a queda na produção de forragem na época seca do ano, pois, o déficit hídrico severo limita o crescimento das gramíneas forrageiras (Pirnajmedin et al., 2024). Contudo, a disponibilidade de água no solo pode ser diminuída também em períodos de estiagem que ocorrem durante a estação chuvosa (conhecida popularmente como “época das águas”). Isso acontece principalmente devido a variações na distribuição das chuvas que tem sido cada vez mais frequentes devido às mudanças climáticas (Souza et al., 2020; Sloat et al., 2018). Assim, apresenta-se um novo entrave à produção de forragem cujos impactos são pouco conhecidos pois, o tema tem sido tratado de maneira secundária (Dejene et al., 2023; Santos et al., 2024).

As gramíneas forrageiras apresentam estratégias morfogênicas de crescimento em função de seu ambiente de cultivo, alterando, por exemplo, a velocidade de aparecimento e alongamento de órgãos como folhas e colmos (Zanine et al., 2018; Nelson e Moore, 2020), mas essas respostas a períodos curtos de estiagem carecem ser elucidadas em condição de campo, bem como sua influência em parâmetros estruturais e produtivos das forrageiras como o perfilhamento e o próprio acúmulo de forragem. Além disso, alterações na composição morfológica e na qualidade da forragem em decorrência da estiagem são igualmente importantes por afetar o aproveitamento da forragem pelos animais (Chand et al., 2022), e carece investigações em campo (Catunda et al., 2022).

Uma alternativa para lidar com os períodos de seca é a irrigação das pastagens. Sistemas de irrigação cada vez mais eficientes têm sido utilizados em pastagens,

sendo mais recente o uso de gotejamento subterrâneo (Rocha et al., 2025). Esse sistema possibilita aplicar água e nutrientes diretamente na zona radicular pela prática da fertirrigação, mas ainda é necessário se a prática da irrigação por gotejamento subsuperficial pode beneficiar significativamente os mecanismos de crescimento, a produção e/ou a qualidade da forragem, e mais ainda, se as espécies forrageiras cultivadas sob estiagem diferem na resposta à irrigação.

Diante do exposto, surgiram as seguintes perguntas: i) Quais os impactos da estiagem nos aspectos morfogênicos, estruturais, produtivos e na qualidade da forragem nas gramíneas Mavuno e Zuri?; ii) A irrigação por gotejamento subterrâneo promove ganhos e atenua os prejuízos da estiagem no crescimento, produção e qualidade da forragem? iii) As espécies de gramíneas se distinguem quanto às estratégias para lidar com a estiagem e na resposta à irrigação? Ao responder essas questões serão elucidados os prejuízos da estiagem para a produção de forragem, bem como o potencial de uso da irrigação nesse contexto, além de elucidar as estratégias de crescimento das forrageiras diante da estiagem e no cultivo irrigado.

Esse estudo investigou, portanto, como períodos curtos de estiagem afetam os processos morfogênicos de crescimento das forrageiras Mavuno e Zuri cultivadas em sequeiro ou sob irrigação, e quais os impactos nas características estruturais, produtivas e na qualidade da forragem, bem como os benefícios da irrigação na atenuação dos impactos da estiagem.

2 Material e métodos

2.1 Localização, período experimental e condições ambientais

O estudo foi realizado a partir de um experimento de campo na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Estadual Paulista (Jaboticabal, São Paulo), localizada nas coordenadas 21° 14' 54" S e 48° 17' 06" W, altitude de 560 m, sob clima Aw tropical chuvoso com inverno seco. O período experimental foi de outubro de 2022 a abril de 2023 (primavera-verão), durante o qual foram obtidos os dados da estação meteorológica localizada na universidade, que incluem evapotranspiração, temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar global e

precipitação pluvial, sendo contabilizado também o volume de água aplicado via irrigação (Fig 1 a, b).

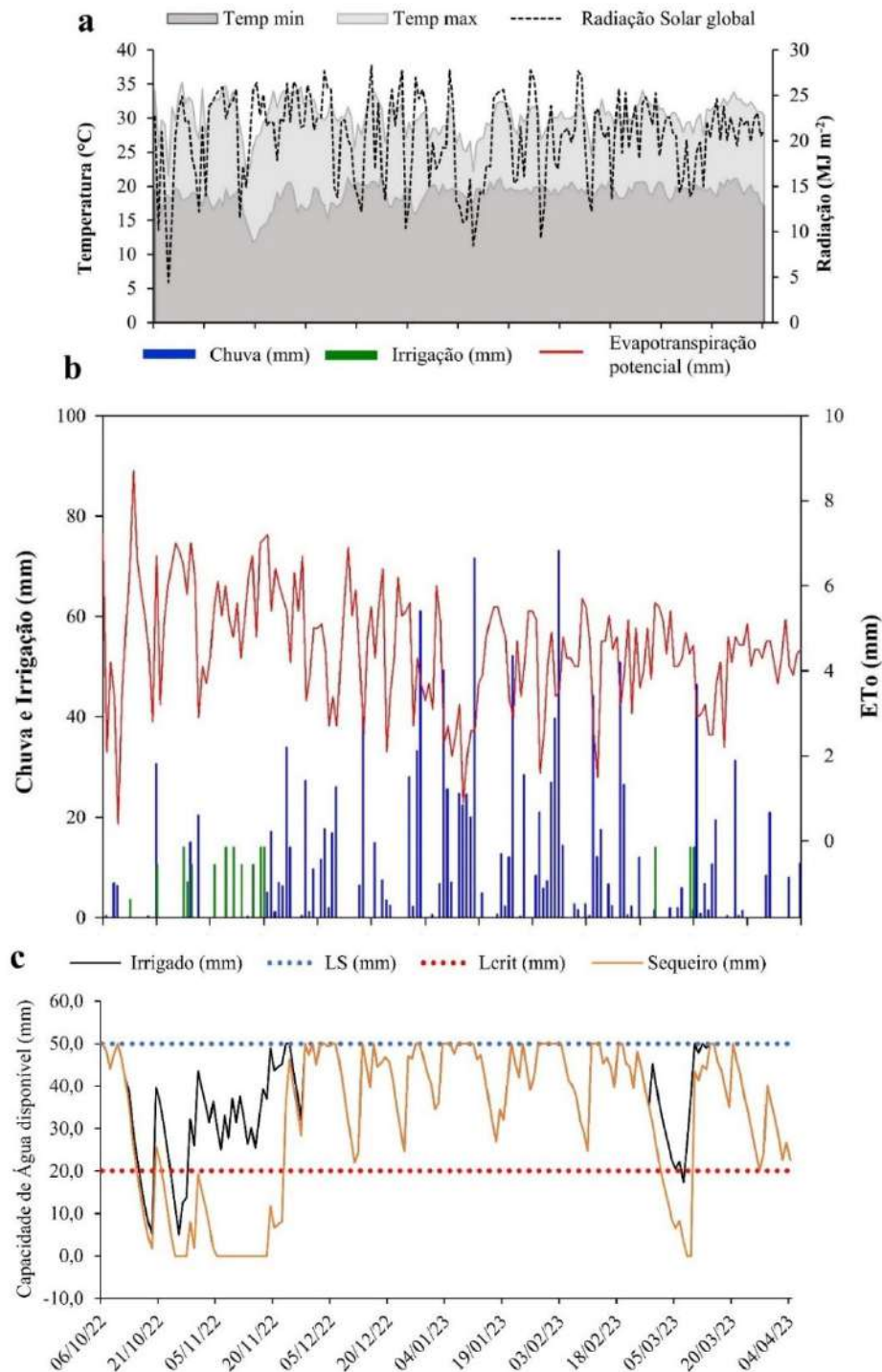


Fig 1 Temperatura do ar e radiação solar global (a), volume de chuvas, irrigação e evapotranspiração potencial (b), capacidade de água disponível no solo (c) durante o período experimental de outubro de 2022 a abril de 2023, Jaboticabal-SP.

2.2 Caracterização, preparo do solo e instalação do sistema de irrigação

Utilizou-se uma área experimental de Latossolo Vermelho eutrófico (LVef) (Andrioli e Centurion, 1999). A análise química anterior ao experimento (Raij et al., 2001), retornou os resultados seguintes para as camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade, respectivamente: pH: 5.8 e 6.0, matéria orgânica (MOS): 22 e 22 g dm⁻³, P: 78 e 51 mg dm⁻³, potássio (K): 5.5 e 3.6, cálcio (Ca): 46 e 44, magnésio (Mg): 15 e 15 mmol_c dm⁻³, enxofre (S): 3 e 4, boro (B): 0.32 e 0.25, cobre (Cu): 3.4 e 3.5, ferro (Fe): 6 e 5, manganês (Mn): 25.5 e 18.6, e zinco (Zn): 1,6 e 1 mg dm⁻³, H+Al = 21 e 18 mmol_c dm⁻³, CTC (capacidade de troca catiônica): 88 e 81 mmol_c dm⁻³, V (Saturação por bases: Ca + Mg +K/CTC): 76 e 77%. A análise granulométrica (Donagema et al., 2011) teve como resultados os teores de argila: 582 e 591 g kg⁻¹, silte: 235 e 231 g kg⁻¹, areia: 183 e 178 g kg⁻¹ para as camadas 0-20 e 20-40 cm de profundidade, permitindo classificar a textura do solo como argilosa (USDA, 2017).

O preparo do solo foi realizado com gradagem (fevereiro de 2022) e abertura dos sulcos para instalação do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial. As mangueiras gotejadoras (Petroisa, modelo Durazio, DN 16 com vazão de 1,45 L h⁻¹, espaçados em 30 cm) foram instaladas em sulcos de 20 cm de profundidade, com espaçamento de 80 cm entre mangueiras. O sistema foi testado e apresentou ótimo desempenho quanto à sua uniformidade de distribuição (92%) (Bernardo et al., 2009).

2.3 Desenho e implantação do experimento

Foram avaliados quatro tratamentos organizados em delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 2, sendo duas espécies forrageiras (*Urochloa brizantha* x *U. ruziziensis* cv. Mavuno e *Megathyrus maximus* cv. Zuri), e duas condições hídricas de cultivo (irrigado e sequeiro). Os tratamentos foram distribuídos em quatro blocos casualizados, que constituíram as repetições. Parcelas de 3 x 4,8 m (14,4 m²) foram delimitadas, nas quais foi realizada a semeadura das forrageiras no mês de abril de 2022, de forma manual na taxa de 10 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis. Durante o período de implantação do pasto todas as parcelas foram irrigadas por aspersão convencional. No mês de outubro de 2022 procedeu-se um corte de uniformização, com roçadora manual, conforme as alturas de resíduo de 35 e 15 cm

para os capins Zuri e Mavuno, respectivamente (Barbosa et al., 2021; Silva et al., 2020) para estimular seu perfilhamento basal.

2.4 Aplicação dos tratamentos e manejos

Após o corte de uniformização foram aplicados os tratamentos com parcelas irrigadas por gotejamento subterrâneo ou em sequeiro (sem irrigação). A partir da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente determinados em curva de retenção de água no solo (Klute, 1986), foi estimada a capacidade de armazenamento de água na camada de 0 a 40 cm do solo, que foi igual a 50 mm. A irrigação foi realizada mantendo a capacidade de campo de 50 mm de água no solo (até 0,4 m de profundidade). O sistema de irrigação foi acionado sempre que houve perda de 30 mm de água no solo, resultando em uma lâmina total de irrigação de 175 mm no período experimental.

Considerando que a fertilidade do solo estava adequada para o cultivo das gramíneas, foram realizadas somente adubações de manutenção após cada corte do pasto, repondo a quantidade exportada de N, P, K e S pelas forrageiras em cada tratamento (Dubeux Jr et al., 2007; Quaggio et al., 2022). As fontes utilizadas foram ureia, cloreto de potássio, sulfato de amônio e fosfato monoamônico purificado (fertirrigação) ou superfosfato simples para a condição de sequeiro. Nas parcelas irrigadas foi realizada fertirrigação e em sequeiro as adubações foram realizadas manualmente distribuindo os adubos a lanço.

2.5 Coleta de dados

2.5.1 Análises morfogênicos e estruturais

Foram realizadas avaliações para estimativa do número de perfilhos por m² das forrageiras em cada tratamento. Para isso, delimitou-se touceiras ao acaso das gramíneas utilizando uma moldura plástica de 625 cm². Após cada corte do pasto procedeu-se a contagem dos perfilhos mortos e vivos, permitindo obter a média de perfilhos vivos por m² (Bahmani et al., 2003). Durante a rebrota, o crescimento do pasto foi monitorado, a partir de dois perfilhos por parcela, selecionados e identificados com fitas coloridas. Esses perfilhos foram avaliados a cada três dias,

aferindo a exposição da lígula, comprimento dos pseudocolmos, e o comprimento das lâminas foliares em expansão, expandida ou em senescência.

Com os dados coletados calculou-se as variáveis: taxa de aparecimento foliar, TApF (folha por perfilho por dia), taxa de alongamento foliar, TAIF (mm por dia), duração de vida da folha, DVF (dias) e a taxa de alongamento do colmo, TAIC (mm dia⁻¹) conforme Marcelino et al. (2006). Obteve-se também dados de perfilhamento: taxa de aparecimento de perfilhos, TApP $\{[(\text{novos perfilhos}/\text{total de perfilhos vivos no ciclo anterior}) \times 100]/\text{dias de rebrota}\}$; taxa de mortalidade de perfilhos, TMoP $\{[(\text{perfilhos mortos}/\text{total de perfilhos vivos no ciclo anterior}) \times 100]/\text{dias de rebrota}\}$, e taxa de sobrevivência de perfilhos (TS = 1-TMoP) (Carvalho et al., 2000).

2.5.2 Variáveis biométricas, produtivas e composição morfológica da biomassa

A altura do dossel (cm) foi aferida em cinco pontos por parcela imediatamente antes de cada corte do pasto, utilizando régua de manejo graduada. A coleta da massa de forragem do estrato pastejável foi realizada quando o pasto atingia alturas de entrada de 85 e 35 cm, para os capins Zuri e Mavuno, respectivamente, utilizando molduras de 2,25 e 1,0 m² para os capins Zuri e Mavuno, respectivamente. A forragem coletada na área delimitada foi pesada imediatamente, obtendo a massa fresca. Após a amostragem, a uniformização da altura de resíduo de 35 e 15 cm do pasto foi realizada com roçadora manual. Durante o período experimental foram realizados dez e sete cortes no pasto nos tratamentos irrigado e sequeiro, respectivamente.

No momento da coleta retirou-se uma amostra de aproximadamente 100 g de massa fresca. A mesma foi pesada e levada à estufa de circulação forçada de ar a 65 ± 5 °C para secagem até massa constante, para obtenção da MS. Com os teores de MS, altura do pasto, e duração do ciclo, calculou-se a produção de massa de forragem (MF, t ha⁻¹ de MS), a densidade da massa de forragem (DMF, kg ha⁻¹ cm⁻¹ de MS), a taxa de acúmulo de forragem (TAF, kg ha⁻¹ d⁻¹ de MS), e estimou-se a capacidade de suporte do pasto (CS, UA ha⁻¹, onde UA = unidade animal ou 450 kg peso vivo).

Uma segunda amostra de forragem fresca foi utilizada para o fracionamento morfológico da biomassa em lâmina foliar, colmo e material morto, que foram secas em estufa 65 ± 5 °C até massa constante. Calculou-se então os percentuais das

frações morfológicas lâmina foliar, colmo e material morto na forragem das gramíneas (Marcelino et al., 2006).

2.5.3 Composição química e digestibilidade da forragem

O material passado em moinho tipo Willey foi utilizado para determinar os percentuais de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA) e lignina na massa seca (AOAC, 2012; Van Soest, 1963), através dos quais calculou-se os teores de hemicelulose (diferença entre FDN e FDA) e celulose (diferença entre FDA e lignina).

Foram calculados também os percentuais de proteína bruta (PB%) igual o teor de N x 6,25, sendo o N determinado pelo método Kjeldahl. Considerando a produção de MS e o teor de proteína, calculou-se o rendimento de proteína total: $PBt (t ha^{-1}) = [teor de PB (\%) \times produção MS (kg ha^{-1})] / 100$ (Sowiński, 2024). Foi analisada a digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVMS) (Tilley e Terry, 1963), e os nutrientes digestíveis totais foram estimados pela equação: $NDT (\%) = Deg + (1,25 \cdot EE) - MM$, onde Deg = degradabilidade; 1,25 = fator de correção, EE = extrato etéreo, MM = matéria mineral (Van Soest, 1994).

2.4 Análises estatísticas

Após a análise de pressupostos normalidade, homogeneidade e independência dos resíduos (Jarque e Bera, 1980; Bartlett, 1937), os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$). Em casos de diferença entre as médias, a comparação foi realizada pelo teste Tukey ($p < 0,05$), utilizando o software SPEED Stat versão 3.2 (Carvalho et al., 2020).

Para analisar as relações entre as variáveis foi realizada uma análise de correlação de Pearson entre as variáveis ($p < 0,05$). Uma análise de componentes principais (ACP) foi obtida utilizando uma matriz de covariância, com padronização dos dados (z-score com média zero) e avaliação da interdependência entre as variáveis utilizando a razão entre o maior e o menor autovalor (número de condições, $NC < 120$) (Carvalho et al., 2024). Foi acoplada à ACP uma análise de cluster pelo método de ligação simples e análise de agrupamento hierárquico pela distância euclidiana, utilizando linguagem de programação R (RStudio versão 4.3.3)

3 Resultados

3.1 Parâmetros morfogênicos e estruturais

As condições hídricas sem irrigação e com irrigação apresentaram interação significativa ($p < 0,05$) com o fator espécie para as variáveis alongamento de folhas e duração de vida da folha (Fig 2 b, c), com efeitos isolados de pelo menos um dos fatores em todos os parâmetros foliares analisados (Fig 1 a-h).

Na condição de sequeiro o capim Mavuno em relação ao Zuri apresentou maiores taxas de aparecimento de folhas (+65%) de perfilhos (+78%) e maior número de perfilhos (+78%) e taxa de alongamento de colmo (Fig 2 a, e, h), enquanto o capim Zuri em sequeiro se destacou pelo maior alongamento foliar (+56%), maior duração de vida da folha (+5%), e menor alongamento de colmo (-90%) em comparação com Mavuno (Fig 2 b, c, d).

O cultivo irrigado em relação ao sequeiro promoveu diminuição na duração de vida da folha tanto para Mavuno (-11%) quanto para o capim Zuri (-18%) (Fig 2 c), aumentos no número de perfilhos vivos (+30%) no capim Mavuno e no alongamento do colmo do capim Zuri (+290%) (Fig 2 h, d).

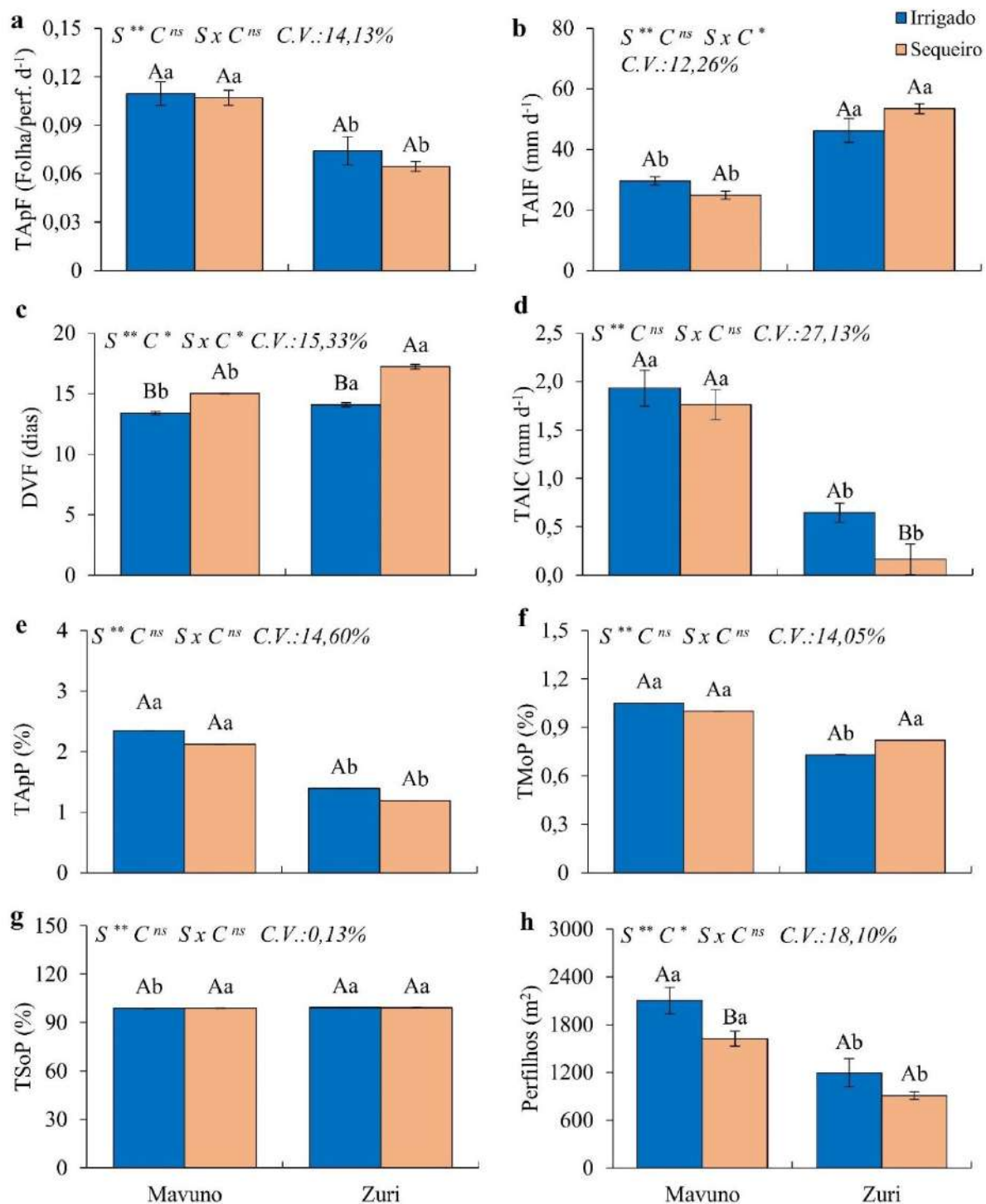


Fig 2 Taxa de aparecimento foliar (a), alongamento foliar (b), duração de vida da folha (c), alongamento do colmo (d), aparecimento de perfilhos (e), mortalidade de perfilhos (f), sobrevivência de perfilhos (g) e número de perfilhos (h) nas forrageiras Mavuno e Zuri sob condições de irrigação ou sob restrição hídrica em condições de campo em Jaboticabal - SP, Brasil. ^{ns}, * e ** correspondem ao teste F não significativo, significativo a 5% e 1%, respectivamente. As médias foram testadas pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam as médias

entre condições e letras minúsculas comparam o efeito das espécies. As barras representam o erro padrão da média, $n = 4$.

3.2 Produção e composição morfológica da forragem

Observou-se interação significativa ($p < 0,05$) entre os fatores espécie e condição hídrica para massa de forragem, taxa de acúmulo de forragem, capacidade de suporte e percentual de material morto no estrato pastejável (Fig 3 b, d, e, h). Houve efeito de pelo menos um dos fatores em todos os parâmetros produtivos e morfológicos (Fig 3 a-h).

No cultivo em sequeiro o capim Mavuno apresentou maior densidade da massa de forragem (101%) que o capim Zuri. O capim Zuri por sua vez se destacou em relação ao capim Mavuno na condição de sequeiro com maiores altura de parte aérea (+136%), taxa de acúmulo de forragem (+26%), produção de massa de forragem (+29%) e capacidade de suporte (+26%) (Fig 3 a-e). Além disso, na composição morfológica da MS, o capim Zuri apresentou menor percentual de colmo (70%) e de material morto na MS (95%), e maior percentual de lâmina foliar no estrato pastejável (+40%) em relação ao capim Mavuno na condição de sequeiro (Fig 3 f, g, h).

Na condição irrigada o capim Zuri apresentou em comparação ao Mavuno maiores altura do dossel (+131%) e percentual de lâmina foliar (+40%), e menores percentual de colmo (-74%), e de material morto na MS do estrato pastejável (-100%) (Fig 3 a-h), enquanto o capim Mavuno manteve maior densidade de massa de forragem que o Zuri (Fig 3 c).

A irrigação por gotejamento em relação ao sequeiro promoveu no capim Mavuno diminuição no percentual de material morto no estrato pastejável (-34%), e aumento na taxa de acúmulo de forragem (+30%), na produção de massa de forragem (+41%), e na capacidade de suporte (+30%) (Fig 3 a-h). No capim Zuri sob irrigação

observou-se diminuição do percentual de colmo (-12%) e incremento no percentual de lâmina foliar no estrato pastejável, comparado ao cultivo sem irrigação (Fig 3 f, g).

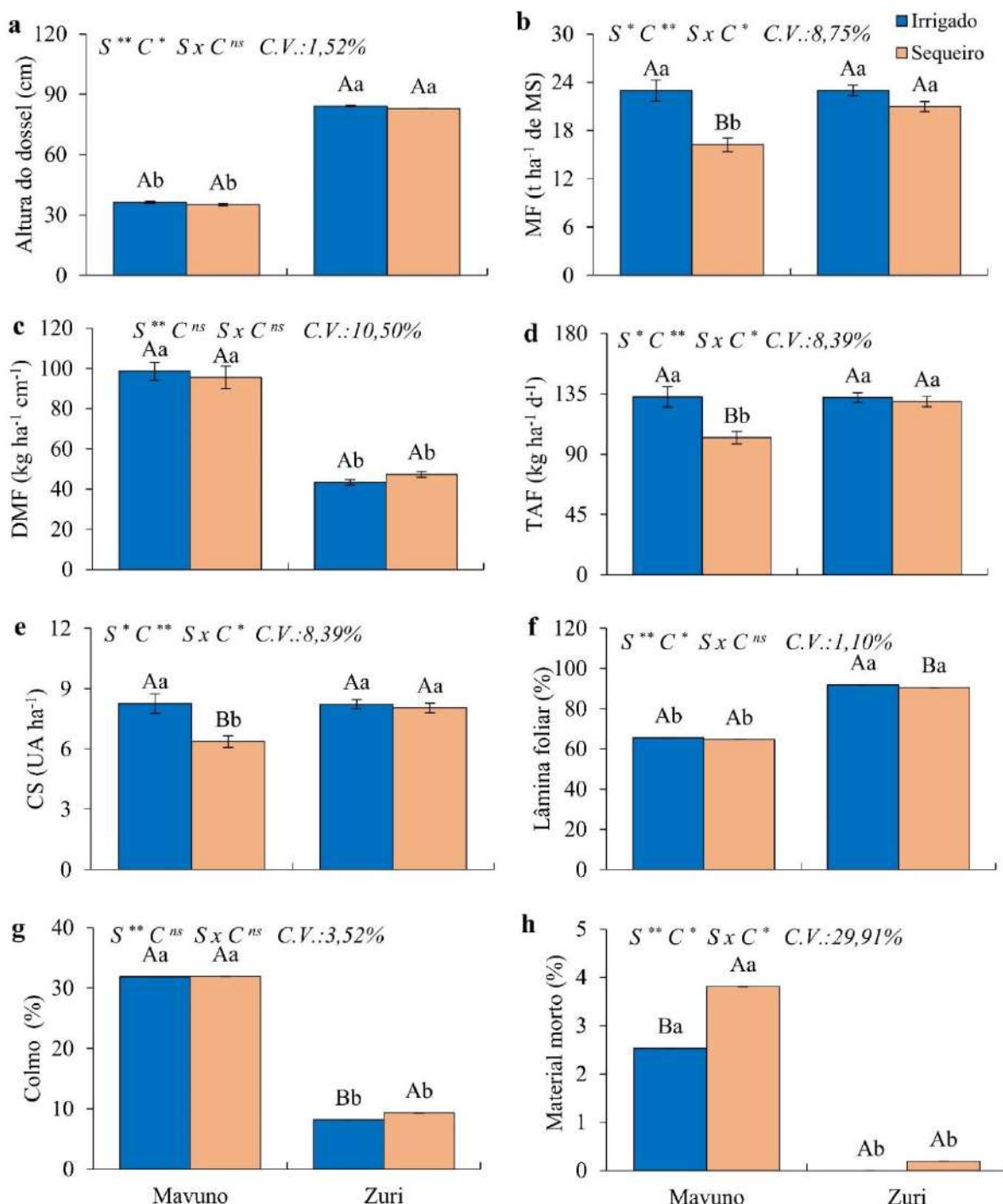


Fig 3 Altura do dossel (a), massa de forragem (b), densidade da massa de forragem (c), taxa de acúmulo de forragem (d), capacidade de suporte (e), percentuais de lâmina foliar (f), de colmo (g) e de material morto (h) no estrato pastejável das forrageiras Mavuno e Zuri sob condição irrigada ou sob restrição hídrica em condições

de campo em Jaboticabal - SP, Brasil. ^{ns}, * e ** correspondem ao teste F não significativo, significativo a 5% e 1%, respectivamente. As médias foram testadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam médias entre condições hídricas e letras minúsculas comparam o efeito das espécies. As barras representam o erro-padrão da média, n = 4.

3.3 Composição química e digestibilidade da forragem

Foi observado o efeito isolado do fator espécie para as variáveis: nutrientes digestíveis totais, teores de celulose e lignina, e para a digestibilidade da MS, efeito da condição hídrica no teor de proteína bruta, e influência de ambos fatores para a produção total de proteína por hectare ($p < 0,05$) (Fig 4 a-g).

Na condição de sequeiro o capim Zuri apresentou maior produção de proteína por hectare (+28%) em relação ao capim Mavuno (Fig 4 b). No cultivo irrigado em relação ao sequeiro houve diminuição na proteína bruta do capim Mavuno (-9%) e do capim Zuri (-5%) (Fig 4 a). A produção de proteína por hectare aumentou com a irrigação no capim Mavuno irrigado em comparação com seu cultivo em sequeiro (de 3 para 3,8 t ha⁻¹) (Fig 4 b).

O capim Mavuno apresentou menor teor de celulose em sequeiro (-26%) e também sob irrigação (-19%), bem como maior teor de nutrientes digestíveis totais (+13%) que o capim Zuri em ambas condições hídricas (Fig 4 d, f). A digestibilidade da MS foi maior no capim Mavuno em relação ao capim Zuri tanto em sequeiro (+16%) quanto no cultivo irrigado (+14%) (Fig 4. g). Na condição irrigada o capim Mavuno apresentou ainda menor teor de lignina que o capim Zuri (10%) (Fig 4 e).

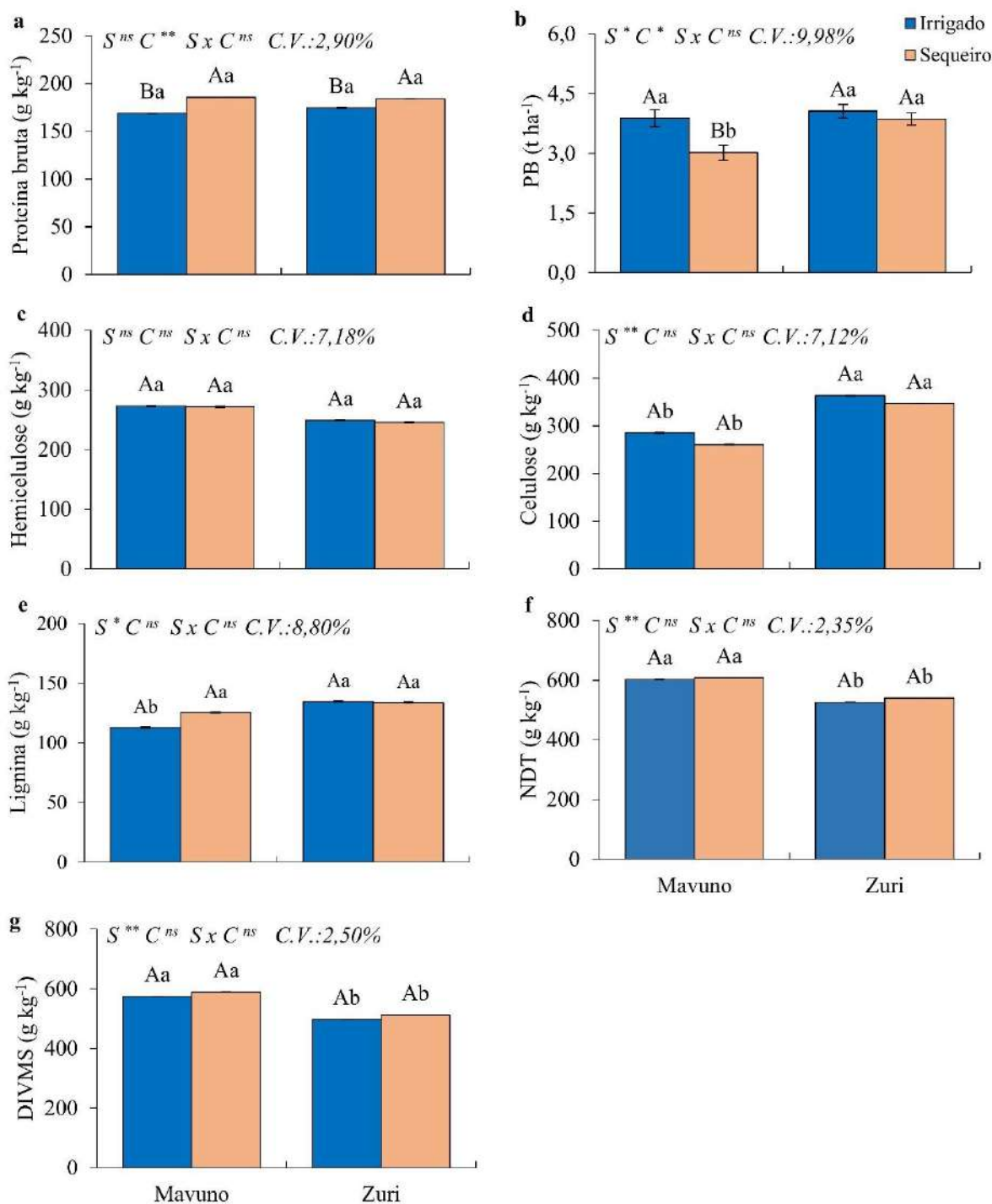


Fig 4 Proteína bruta (a), proteína bruta total por hectare (b), percentuais de hemicelulose (c), celulose (d), lignina (e) nutrientes digestíveis totais (f) e digestibilidade *in vitro* da matéria seca (g) do estrato pastejável das forrageiras Mavuno e Zuri sob condição irrigada ou sob restrição hídrica em condições de campo em Jaboticabal - SP, Brasil. *ns*, * e ** correspondem ao teste F não significativo, significativo a 5% e 1%, respectivamente. As médias foram testadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Letras maiúsculas comparam médias entre

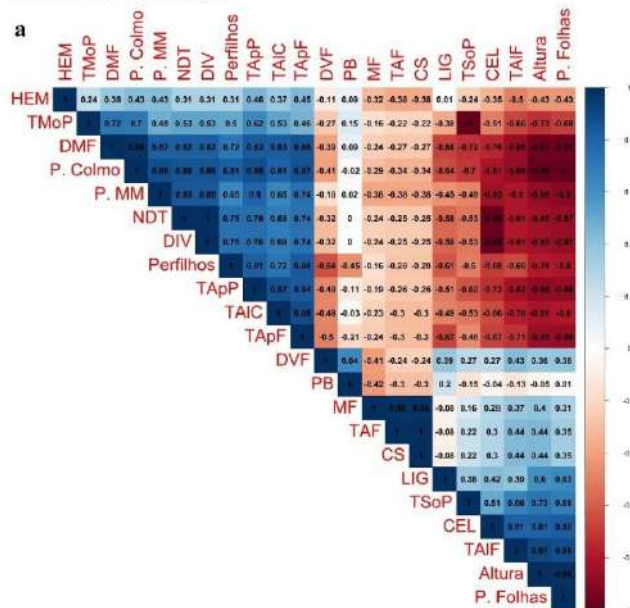
condições e letras minúsculas comparam o efeito das espécies. As barras representam o erro padrão da média, $n = 4$.

3.4 Análises de correlação e de componentes principais

A análise de correlação (Fig 5 a) permitiu verificar fortes relações positivas entre a TApF e o número de perfilhos ($r = 0,84^{**}$), a densidade da MF ($r = 0,86^{**}$), e também com o percentual de NDT na forragem ($r = 0,74^{**}$). Relação positiva foi observada também entre DMF e a taxa de mortalidade de perfilhos ($r = 0,72^{**}$). Dentre as relações negativas, destacaram-se aquelas observadas entre o percentual de celulose e a digestibilidade ($r = -0,98^{**}$), e entre a duração de vida da folha e o número de perfilhos ($r = 0,64^{**}$).

Para a ACP foram selecionadas apenas variáveis não redundantes estatisticamente (multicolinearidade avaliada pelo índice $NC < 120$), os autovalores das duas componentes principais extraídos foram maiores que um (01). Analisando as condições de cultivo (Fig 5 b) a CP 1 representou 46,5% da variância, sendo que as variáveis que contribuíram positivamente foram o número de perfilhos, alongamento de colmo e NDT. Por outro lado, as variáveis correlacionadas negativamente com a CP1 foram o alongamento de folhas, duração da vida da folha e o teor de lignina. A CP 2 representa 24% da variação as variáveis que apresentaram correlações positivas foram o teor de proteína bruta e a duração da vida da folha. A variável que correlacionou de forma negativa com a CP2 foi a massa de forragem.

Análise de correlação



Análise de componentes principais

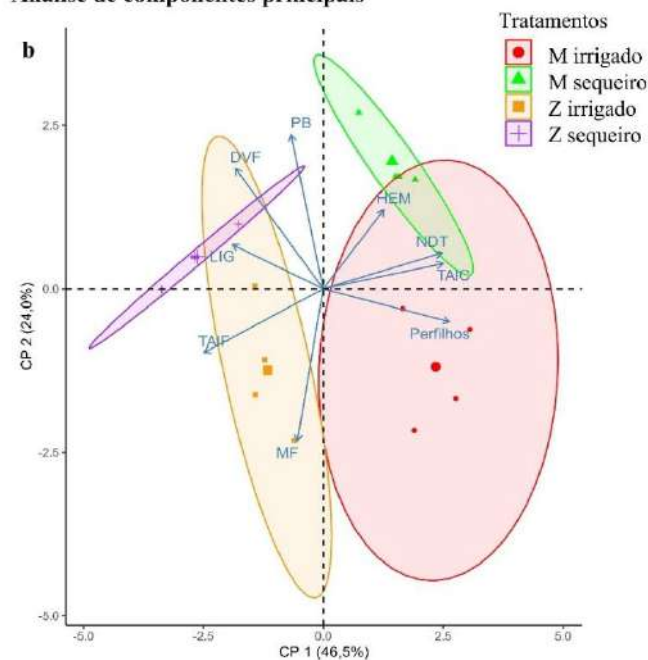


Fig 5 Análise de correlação de Pearson (a) e análise de componentes principais com agrupamento por distância euclidiana (b) no estudo com as forrageiras Mavuno e Zuri sob condições de irrigação ou restrição hídrica em campo, em Jaboticabal-SP, Brasil. HEM: Hemicelulose; CEL: Celulose; LIG: Lignina; NDT: Nutrientes Digestíveis Totais; PB: Proteína Bruta; TApF e TAIF: Taxas de aparecimento e alongamento foliar; DVF: Duração de vida da folha; TAIC: Taxa de alongamento de colmo; TApP, TMOp e TSoP: Taxa de aparecimento, mortalidade e sobrevivência de perfilhos; Perifilhos: número de perfilhos por metro quadrado; Altura: altura do dossel; MF: Massa seca de forragem produzida; DMF: densidade da massa de forragem; TAF: Taxa de acúmulo de forragem; CS: Capacidade de suporte; P. Folhas, P. Colmo e P. MM: percentuais de

folhas verdes, colmo e material morto no estrato pastejável. Tratamentos: Mavuno irrigado, Mavuno sequeiro, Zuri irrigado, Zuri sequeiro.

4 Discussão

4.1 Condição hídrica e espécie forrageira na morfogênese e perfilhamento

As gramíneas forrageiras apresentam diferentes capacidades de lidar com o déficit hídrico severo (Oliveira et al., 2022), e nesta pesquisa ficou evidente que há diferenças também nas suas respostas ao estresse por déficit hídrico durante estiagens. A morfogênese dos capins Zuri e Mavuno sob restrição hídrica no cultivo em sequeiro revelou que o hábito de crescimento de cada espécie está intimamente ligado às suas estratégias para acúmulo de MS diante da condição limitante. Em espécies de crescimento cespitoso como o capim Zuri, a produção de MS está mais ligada à altura que à densidade do dossel (Dias et al., 2021), que se confirma pelos maiores alongamento e duração de vida da folha, e diminuição no alongamento de colmo. O capim Mavuno, de hábito decumbente, investiu no aparecimento de folhas e de perfilhos que corroboram para a maior densidade da forragem.

A irrigação por gotejamento promoveu ganhos na morfogênese das gramíneas neste estudo. A menor duração de vida da folha de ambas espécies estudadas indica o crescimento ativo dessas plantas na condição irrigada. Isso acontece, pois, a disponibilidade de água no solo permite a absorção da água e dos nutrientes de forma otimizada (Amaral et al., 2025; Melo et al., 2025), favorecendo os processos de divisão e alongamento celular ao manter as reações enzimáticas e turgor da célula vegetal em expansão (Coussement et al., 2020), incrementando o aparecimento de perfilhos no capim Mavuno, e o alongamento de colmo no capim Zuri. Assim, a irrigação estimulou a renovação foliar nas gramíneas forrageiras, da qual depende a capacidade fotossintética do dossel (Pittaro et al., 2024), permitindo alocar recursos suficientes para emissão e manutenção de perfilhos vivos.

4.2 Benefícios da irrigação em períodos de estiagem na produção e composição morfológica variam em função da espécie forrageira

O fornecimento restrito de água pode prejudicar diretamente os parâmetros fisiológicos, morfogênicos e produtivos das gramíneas forrageiras (Pirnajmedin et al., 2024; Ramos et al., 2022), porém, características estruturais como altura de dossel e renovação de perfilhos são fortemente ligados à espécie forrageira (Pittarro et al., 2024) e sua dinâmica de morfogênese. Nessa pesquisa isso ficou em evidência pela correlação (Fig 5 a) positiva entre a densidade da MF (superior no capim Mavuno) com a taxa de aparecimento de perfilhos e número de perfilhos ($r = 0,83^{**}$; $r = 0,72^{**}$). Por outro lado houve também alta correlação entre altura do dossel e a taxa de alongamento foliar ($r = 0,91^{**}$), que foram maiores no capim Zuri em sequeiro ou irrigado.

No cultivo em sequeiro ficou evidenciada a tolerância do capim Zuri ao período de estiagem, com uma produção de forragem 29% maior que a do capim Mavuno. Essa produção condiz com a taxa de acúmulo de forragem também superior nessa condição, certamente favorecida pelo alongamento foliar e duração de vida da folha no capim Zuri, superando a densidade do capim Mavuno. Devido a maior produção de forragem, o pasto de capim Zuri apresentou uma capacidade de suporte ($8,1 \text{ UA ha}^{-1}$) superior à do capim Mavuno ($6,4 \text{ UA ha}^{-1}$). Assim, confirma-se que diante do déficit hídrico as estratégias de crescimento e alocação de recursos do capim Zuri lhe conferiram maior tolerância à estiagem.

Além das diferenças morfogênicas e estruturais, as gramíneas forrageiras podem diferir também quanto à capacidade de absorver e utilizar a água e os nutrientes durante o período de déficit (Melo et al., 2025). Essa capacidade varia em função, por exemplo, da eficiência de transportadores de nutrientes na membrana (Prado, 2021), e da diminuição do potencial osmótico celular (Islam e Obour, 2021). De fato, foi demonstrado em estudo recente que sob restrição hídrica o capim Zuri apresenta acúmulo de aminoácidos e eficiência de uso de nutrientes superiores em relação ao capim Mavuno (Amaral et al., 2025), e certamente contribui para seu crescimento em períodos de estiagem.

A irrigação por gotejamento subterrâneo em pastagens é uma prática recente, e este estudo é pioneiro em investigar o potencial de uso desse sistema em pastagens

suscetíveis a períodos de estiagens. Essa pesquisa evidenciou que o gotejamento subterrâneo promove ganhos em parâmetros produtivos como o acúmulo e a produção total de forragem, aumentando a capacidade de suporte do pasto de capim Mavuno, que foi responsivo à irrigação.

No capim Zuri, que foi mais tolerante à estiagem, os benefícios da irrigação não foram suficientes para aumentar a produção de forragem no período estudado. Contudo, a produção de forragem e a capacidade de suporte de ambas gramíneas foi similar no cultivo irrigado, devido possivelmente ao alongamento e à duração de vida da folha superiores no capim Zuri, compensando o menor perfilhamento dessa forrageira, diferentemente do observado para outras espécies forrageiras (Pittaro et al., 2024).

O crescimento otimizado das forrageiras sob irrigação se refletiu no encurtamento do período de rebrota (intervalo entre cortes), que passou de 24 dias no cultivo em sequeiro para 17 dias na condição irrigada para ambas forrageiras. Esse período tem importante aplicação prática, pois, permite um maior acúmulo de biomassa pelo pasto, e consequentemente mais ciclos de pastejo durante o ano, além de incrementar a produção de proteína animal por hectare (Faji et al., 2022), contribuindo para uma pecuária a pasto mais eficiente e sustentável.

Mesmo com uma produção de forragem otimizada, é importante conhecer fatores relacionados à qualidade da forragem, dentre os quais está a composição morfológica da MS, isto é, a proporção de lâminas foliares, colmo e material morto na forragem. Neste estudo, o capim Zuri se destacou pela maior produção de lâmina foliar verde e menos colmo na MS, independente da condição hídrica. Esse resultado é favorecido pelo manejo de corte que foi realizado conforme as alturas de entrada e saída que se baseiam na interceptação luminosa pelo dossel, contribuindo para o acúmulo de folhas, e menor produção de colmos e material morto. No caso do capim Mavuno, uma maior proporção de colmos e de material morto na forragem foi observada como resultado do maior alongamento de colmo e menor duração de vida da folha.

O cultivo irrigado melhorou a composição morfológica da MS de ambas gramíneas estudadas, minimizando a produção de material morto pelo capim Mavuno em 34% e de colmo pelo capim Zuri em 12%, além de incrementar a proporção de

lâmina foliar no estrato pastejável do capim Zuri. Essa composição otimizada da MS com mais lâmina foliar, e menor proporção de colmo e de material morto contribui para maior qualidade e consumo da forragem, pois as folhas verdes e tenras são selecionadas pelos animais em pastejo em detrimento de colmos e material senescente (Nelson e Moore, 2020).

4.3 Condição hídrica e espécie na composição química e digestibilidade da forragem

A compreensão de fatores qualitativos da forragem é necessária para tomadas de decisão na utilização de práticas de cultivo ou manejo para otimizar a produtividade do sistema de produção a pasto. Na composição da forragem tem destaque a energia que ela pode fornecer aos animais, representada pelo NDT, e essa pesquisa evidenciou que independente da condição hídrica de cultivo, o capim Mavuno se sobressai com maior teor de NDT, relacionado possivelmente com o menor teor de celulose do capim Mavuno em relação ao capim Zuri em sequeiro ou sob irrigação, que favorece a degradabilidade da fibra. Similarmente, a cultivar Marandu (*U. brizantha*) também apresentou teor de celulose superior ao da cultivar Áries (*M. maximus*) (Lima et al., 2018), confirmando o padrão relativo à espécie forrageira no teor de celulose.

No cultivo das gramíneas em sequeiro, este estudo observou teores similares de lignina entre as forrageiras, porém, o teor de NDT e a digestibilidade da MS do capim Zuri foi inferior à do capim Mavuno, mesmo com uma maior proporção de folhas no estrato pastejável. Esses resultados sugerem que além do teor de lignina, outros fatores podem ter influenciado na digestibilidade da forragem, como o arranjo entre lignina e celulose, pois, a lignina é recalcitrante à ação microbiana no rúmen, e suas ligações com a celulose diminuem também a ação dos microrganismos ruminais sobre a celulose, afetando a geração de energia como ácidos graxos voláteis a partir da celulose (Weimer, 2022). No pasto irrigado foi possível observar a diminuição do teor de celulose e de lignina do capim Mavuno, contribuindo para a maior digestibilidade da forragem dessa gramínea em relação ao capim Zuri sob irrigação.

Em relação à proteína bruta, outro componente essencial na dieta animal, foi evidenciado um efeito de diluição no cultivo irrigado para ambas forrageiras. Esse efeito ocorre comumente quando se tem um incremento na produção de MS (Moral et al., 1995), como foi observado neste estudo devido à irrigação, especialmente para o capim Mavuno. Porém, a produção de proteína por hectare foi superior na condição irrigada em comparação com o sequeiro para as duas gramíneas.

Os resultados deste estudo permitiram, portanto, responder à primeira pergunta da pesquisa, ao elucidar que a estiagem altera a morfogênese e os padrões estruturais, produtivos e qualitativos das gramíneas Mavuno e Zuri, sendo o capim Zuri mais tolerante ao período de déficit hídrico. Os prejuízos observados foram mitigados pelo uso da irrigação por gotejamento subterrâneo, respondendo à segunda questão investigada, e as diferenças intrínsecas da espécie forrageira influenciaram fortemente as estratégias das forrageiras para lidar com a estiagem e na sua resposta à irrigação, sanando a terceira dúvida da pesquisa.

5 Conclusões

Diferenças nas estratégias morfogênicas entre as espécies forrageiras como o alongamento e a longevidade foliar explicam a maior tolerância do capim Zuri à estiagem com maior produção de forragem, e as taxas de aparecimento de folhas e de perfilhos justificam a responsividade do capim Mavuno à irrigação.

O capim Mavuno apresenta maior conteúdo de energia e digestibilidade da forragem no cultivo em sequeiro devido ao menor teor de celulose e no cultivo irrigado pelo menor teor de lignina em relação ao capim Zuri.

A irrigação por gotejamento promove ganhos no crescimento, composição química e digestibilidade da forragem, e permite mais ciclos de rebrota e maior produção de proteína nos pastos de ambas gramíneas.

6 Referências

- Amaral DS, Melo CCF, Dalri AB, Zanine AM, Ferreira DJ, Prado RM. Irrigation reduces drought-related losses in forage grasses by enhancing nutritional and productive characteristics. *Scientific Reports*, 2025 (under review).
- Andrioli, I, Centurion, JF, 1999. Detailed survey of the soils of the Faculty of Agricultural and Veterinary Sciences of Jaboticabal. **Proceedings Brazilian Congress of Soil Science**. 32p. <https://www.fcav.unesp.br/#!/departamentos/solos-e-adubos/informacoes-adicionais/mapa-de-solos-da-fcav/>
- AOAC Association of Official Analytical Chemists (2012) **Official Methods of Analysis**, 19th ed. Gaithersburg, Maryland USA.
- Almeida OG, Pedreira CGS, Assis JA, Pedreira BC, Gomes FJ, Nave RLG (2023). Defoliation management and nitrogen fertiliser rate affect canopy structural traits of grazed guineagrass (*Megathyrsus maximus*) cv. Zuri under rotational stocking. **Crop and Pasture Science**, 74(12), 1201-1209. <https://doi.org/10.1071/CP22388>
- Bahmani, I, Thom, ER, Matthew, C, Hooper, RJ, Lemaire, G, 2003. Tiller dynamics of perennial ryegrass cultivars derived from different New Zealand ecotypes: effects of cultivar, season, nitrogen fertiliser, and irrigation. **Aust. J. Agric. Res.** 54, 803-817. <https://doi.org/10.1071/AR02135>.
- Barbosa, PL, Silva, VJ, Pedreira, CG, Sbrissia, AF, Sollenberger, LE, 2021. Herbage accumulation and tillering dynamics of 'Zuri'guineagrass under rotational stocking. **Crop Science**. 61, 3787-3798. <https://doi.org/10.1002/csc2.20536>
- Bernardo, S, Soares, AA, Mantovani, C, 2009. **Manual de irrigação**, 8ª ed. Viçosa, Minas Gerais. 625p.
- Bartlett, MS. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proc. R. Soc. London**. 160, 268-282 (1937). <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109>
- Carvalho, AMX., Mendes, FQ, Mendes, FQ, Tavares, LDF. SPEED Stat: A free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyzes of experiments. **Crop Breed. Appl. Biotechnol**, 20 (2020). <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3s46>
- Carvalho AMX (2024) **Estatística experimental e observacional: uma nova abordagem sobre os métodos clássicos**, 1ª ed. Lucena L, Lucena C, Lombardi JC, Araújo JCS (eds). Navegando, Uberlândia MG, Brasil. <https://10.29388/978-65-60-70-042-0>
- Carvalho, CAB, Silva, SC, Sbrissia, AF, Pinto, LFM, Carnevalli, RA, Fagundes, JL, Pedreira, CGS, 2000. Tiller demography and dry matter accumulation rates in 'Tifton 85' swards under grazing. **Scientia Agricola**, 57, 591- 600. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000400001>.

Catunda, KL, Churchill, AC, Zhang, H, Power, SA, Moore, BD. (2022). Short-term drought is a stronger driver of plant morphology and nutritional composition than warming in two common pasture species. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 208(6), 841-852. <https://doi.org/10.1101/2021.02.16.431509>

Chand, S, Indu, Singhal, RK, Govindasamy, P. (2022). Agronomical and breeding approaches to improve the nutritional status of forage crops for better livestock productivity. **Grass and Forage Science**, 77(1), 11-32. <https://doi.org/10.1111/gfs.12557>

Coussement, JR, Villers, SL, Nelissen, H, Inzé, D, Steppe, K. (2021). Turgor-time controls grass leaf elongation rate and duration under drought stress. **Plant, Cell & Environment**, 44(5), 1361-1378. <https://doi.org/10.1111/pce.13989>

Dejene, T, Dalle, G, Woldeamanuel, T, Woldeamanuel, T, Mekuyie, M, 2023. Temporal climate conditions and spatial drought patterns across rangelands in pastoral areas of West Guji and Borana zones, Southern Ethiopia. **Pastoralism**. 13, 18. <https://doi.org/10.1186/s13570-023-00278-4>

Dias MBC, Costa KAP, Severiano EC, Bilego UO, Vilela L, Souza WF, Silva ACG, 2021. Cattle performance with *Brachiaria* and *Panicum maximum* forages in an integrated crop-livestock system. **Afr. J. Range Forage Sci.** 39, 230-243. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1901311>

Donagema GK, Campos DB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JM (2001) **Manual de métodos de análise de solo** (Documentos 132). Embrapa Solos, Brasília.

Dubeux Jr JCB, Sollenberger LE, Mathews BW, Scholberg JM, Santos HQ, 2007. Nutrient cycling in warm-climate grasslands. **Crop Science**, 47: 915-928. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.09.0581>

Faji, M, Kebede, G, Feyissa, F, Mohammed, K, Mengistu, G. (2022). Yield, yield components, and nutritive value of perennial forage grass grown under supplementary irrigation. **Advances in Agriculture**, 2022(1), 5471533. <https://doi.org/10.1155/2022/5471533>

Greenwood, PL. (2021). An overview of beef production from pasture and feedlot globally, as demand for beef and the need for sustainable practices increase. **Animal**, 15, 100295. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100295>

Islam, MA, Obour, A. K. (2021). Drought physiology of forage crops. In **Handbook of plant and crop physiology** (pp. 567-578). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003093640>

Jayasinghe, JMP, Pembleton, KG, Donaghy, DJ, Ramilan, T, Barber, DG. (2024). Long-term evaluation of pasture production, seasonality, and variability: An application of the DairyMod pasture model for three tropical species. **European Journal of Agronomy**, 156, 12. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127103>

Jarque, CM, Bera, AK. Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. *Economy. Lett.* 6, 255-259 (1980). [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(80\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0165-1765(80)90024-5)

Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A (Ed). **Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods**. Second edition, p.635-662. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26.7103>.

Lima, DM, Abdalla Filho, AL, Lima, PDMT, Sakita, GZ, Silva, TPDE, McManus, C, Louvandini, H. (2018). Morphological characteristics, nutritive quality, and methane production of tropical grasses in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53(03), 323-331. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000300007>

Marcelino, KRA., Nascimento Jr, DD., Silva, SC., Euclides, VP., Fonseca, DM, 2006. Morphogenetic and structural traits and herbage production of marandugrass under intensities and frequencies of defoliation. **Rev Bras Zootec.** 35, 2243-52. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000800007>

Melo, CCF, Amaral, DS, Prado, RM. (2025). The role of mineral nutrients in plant growth under drought stress. In **Sustainable Agriculture under Drought Stress** (pp. 195-207). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23956-4.00013-2>

Moral, LFG., Boujenna, A, Yanez, JA, Ramos, JM. (1995). Forage production, grain yield, and protein content in dual-purpose triticale grown for both grain and forage. **Agronomy Journal**, 87(5), 902-908. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700050021x>

Nelson, CJ, Moore, KJ. (2020). Grass Morphology. In: **Forages: The science of grassland agriculture**, 2, 23-49. Kenneth J. Moore, Michael Collins, C. Jerry Nelson, Daren D. Redfearn (editors). <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch2>

Oliveira, EMD, Martuscello, JA, Jank, L, Cunha, DDNFVD, Santos, MF. (2022). Evaluation of *Megathyrus maximus* genotypes under water stress conditions. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, 44, e54975. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v44i1.54975>

Pereira, LET, Sousa, LJD, Bertipaglia, LMA., Herling, VR, Tech, ARB. (2021). Critical concentration and management of nitrogen fertilization in the establishment of *Brachiaria* hybrid Mavuno. **Revista Ciência Agronômica**, 52(4), e20207625. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210052>

Pirnajmedin, F, Jaškūnė, K, Majidi, MM. (2024). Adaptive Strategies to Drought Stress in Grasses of the Poaceae Family Under Climate Change: Physiological, Genetic and Molecular Perspectives: A Review. **Plant Physiology and Biochemistry**, 108814. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108814>

Pittaro, MG, Duchini, PG, Guzatti, GC, Sbrissia, AF. (2024). Unraveling the forage productivity puzzle: Comparing fast and slow-growing grasses. **PloS one**, 19(7), e0306692. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306692>

Prado, RM. **Mineral Nutrition of Tropical Plants** (Springer International Publishing, 2021). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>

Quaggio, JA, Alcântara, PB, Cantarella, H, Paulino, VT, Villa, MR, 2022. Forrageiras, In: Cantarella, H, Mattos Jr, D, Boaretto, RM, Quaggio, JA, Van Raij, B. (Eds). **Boletim 100 - Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. Instituto Agrônomo de Campinas, São Paulo.

Raij, B, Andrade, JC, Cantarella, H, Quaggio, JA, 2001. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, 285p.

Rocha, MO, Miranda, AGS, Silva, PA, Alencar, CAB, Cunha, FF. (2025). Performance of 'Sabiá' Grass Irrigated with Drippers Installed in the Subsurface. **Irrigation and Drainage**. <https://doi.org/10.1002/ird.3081>

Santos, ML, Santos, PM, Barioni, LG, Pereira, BH, Cuadra, SV, Pequeno, DNL, Sollenberger, L, 2024. Yield gap analysis framework applied to pasture-based livestock systems in Central Brazil. **Field Crops Res.** 314, 109416. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109416>.

Silva, HMS, Vendramini, JM, Oliveira, FCL, Soares Filho, CV, Kaneko, M, Silveira, ML, Yarborough, JK, 2020. Harvest frequency effects on herbage characteristics of 'Mavuno' brachiariagrass. **Crop Sci.** 60, 1113-1122. <https://doi.org/10.1002/csc2.20046>

Souza, R, Hartzell, S, Feng, X, Antonino, ACD, Souza, ES, Menezes, RSC, Porporato, A. (2020). Optimal management of cattle grazing in a seasonally dry tropical forest ecosystem under rainfall fluctuations. **Journal of Hydrology**, 588, 125102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125102>

Sowiński, J. (2024). Intercropping maize (*Zea mays* L.) and field beans (*Vicia faba* L.) for forage, increases protein production. **Scientific Reports**, 14, 16419. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67091-w>

Sloat, LL, Gerber, JS, et al., (2018). Increasing importance of precipitation variability on global livestock grazing lands. **Nature Climate Change**, 8(3), 214-218. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0081-5>

Tilley, JMA, Terry, DR. (1963). A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. **Grass Forage Sci.** 18, 104-11. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>

USDA United States Department of Agriculture (2017) **Soil survey manual**. Soil Survey Division Staff. Soil Conservation Service Volume Handbook 18, chapter 3. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>

Van Soest, PJ. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. **J. AOAC. Int.** 46, 829-835 (1963).

Van Soest, PJ. **Nutritional ecology of the ruminant**. 476 (Cornell University Press, 1994).

Weimer, PJ. (2022). Degradation of cellulose and hemicellulose by ruminal microorganisms. **Microorganisms**, 10(12), 2345. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122345>

Zanine, AM, Nascimento Jr, D, Silva, WL, Sousa, BML., Ferreira, DJ, Silveira, MCT, Parente, HN, Santos, MER. (2018). Morphogenetic and structural characteristics of guinea grass pastures under rotational stocking strategies. **Experimental Agriculture**, 54(2), 243-256. doi:10.1017/S0014479716000223