

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Irrigação por gotejamento subsuperficial no cultivo de *Megathyrsus maximus*
(Syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Mombaça

Danielle Morais Amorim

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2023

Danielle Morais Amorim
Engenheira Agrícola e Ambiental

Irrigação por gotejamento subsuperficial no cultivo de *Megathyrus maximus* (Syn.
Panicum maximum Jacq.) cv. Mombaça

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **FERNANDO CAMPOS MENDONÇA**

Coorientador:

Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Amorim, Danielle Morais

Irrigação por gotejamento subsuperficial no cultivo de *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Mombaça / Danielle Morais Amorim. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

71 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Irrigação de pastagem 2. SDI 3. Forrageira tropical 4. Tecnologia na agricultura I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ruth e Virgílio, e às minhas irmãs, Diane e Débora.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela graça e oportunidade de fazer um doutorado na Esalq/USP. Não teria chegado até aqui se não fosse a vontade divina.

Aos meus pais, por todo cuidado e apoio a mim direcionados nos anos do doutorado. Mesmo distantes geograficamente, não deixaram de estar presentes na minha jornada de pós-graduação. Gratidão também às minhas irmãs pelo apoio e carinho. Estendo minha gratidão também aos meus tios, tias, primos e primas, pelo apoio, carinho e pelas visitas que recebi de alguns deles em Piracicaba – SP durante o período de doutorado.

Ao meu orientador, professor Dr. Fernando Campos Mendonça, por todo apoio, incentivo, ajuda e boas conversas que tivemos durante os anos de pós-graduação. Ao professor Dr. Rubens Duarte Coelho, por se disponibilizar na orientação e pelas ações de trabalho que damos início, mas não foi possível de concluí-las em razão do difícil período de pandemia enfrentado, acarretando mudanças em alguns planos de execução.

Aos meus amigos e colegas de pós, pela oportunidade que tive de compartilhar com eles tantos momentos juntos, tanto aqueles de estudo como também os de confraternização. Que saudade! Aquele abraço para os que fizeram parte do “Corredor”: Adriano, Ailson, Alex, Natália, Isa, Jeferson, Jéssica, Hugo, Diego, Tércio, Lari, Rony, Ângelo, Júnior, Juliana, Martiliana, Brenda, Thaís, Rubmara, Otávio, Timóteo, Luciano, Tibério, Carlos... Um abraço especial aos “irmãos” de orientação: Arthur, Fernanda, Débora, Amauri, Beth e Simone.

Alex, Amauri e Rubmara: um segundo abraço a vocês pelo apoio em algumas atividades desse trabalho, companhia e amizade. Muito obrigada, de coração...

Aos professores do PPGESA, obrigada por cada conhecimento transmitido em aula, cada dúvida tirada, cada conversa corriqueira... Meus agradecimentos também aos funcionários do departamento pelo apoio, ajuda e carinho, em especial: seu Antônio, Paulinha, Gil, Áureo, Davilmar, Ângela, Bia, Ivone, Zé Geraldo, Lino...

Ao Dr. Ivo Zution, pela ajuda de peso dada a este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, bem como à Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz – FEALQ, pela bolsa emergencial concedida após finalização do financiamento da Capes.

A todos que me apoiaram de alguma forma durante meus anos cursando o doutorado na Esalq... Muito obrigada.

EPÍGRAFE

“O coração do entendido adquire conhecimento, e o ouvido dos sábios procura o saber.”

Rei Salomão, citado no livro de Provérbios, 18.15

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO GERAL	11
1.1. Objetivo geral	12
1.2. Objetivos específicos	12
Referências	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. Irrigação de pastagens	15
2.2. Irrigação localizada	16
2.3. Irrigação por gotejamento subsuperficial	16
2.4. <i>Megathyrus maximus</i> (Syn. <i>Panicum maximum</i>) cv. Mombaça	18
2.5. Uso de tecnologias na irrigação e no manejo de pastagens	19
Referências	20
3. METODOLOGIA GERAL	25
3.1. Área de estudo	25
3.2. Caracterização do solo da área experimental	25
3.3. Sistema de irrigação	26
3.4. Semeadura e estabelecimento do Mombaça	28
3.5. Sonda capacitiva FDR e manejo da irrigação	29
3.6. Dados biométricos e produtivos do Mombaça	31
Referências	32
4. ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO PERFIL DO SOLO SOB IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL EM CAPIM MOMBAÇA: EFEITOS DE DIFERENTES ESPAÇAMENTOS ENTRE LINHAS LATERAIS DE IRRIGAÇÃO	35
Resumo	35
Abstract	35
4.1. Introdução	36
4.2. Material e Métodos	37
4.3. Resultados e Discussão	41
4.3.1. Variáveis meteorológicas	41
4.3.2. Estimativa do conteúdo de água no solo via sonda FDR	42

4.3.3. Respostas biométricas e produtivas da cultura	46
4.4. Conclusão	49
Referências	49
5. USO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS PARA A OBTENÇÃO DO ÍNDICE NDVI EM CAPIM MOMBAÇA IRRIGADO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL COM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS ENTRE TUBOS GOTEJADORES	55
Resumo	55
Abstract.....	55
5.1. Introdução.....	56
5.2. Materiais e Métodos	57
5.3. Resultados e Discussão.....	61
5.4. Conclusão	66
Referências	67
6. CONCLUSÕES GERAIS	71
6.1. Sugestões para estudos futuros	71

RESUMO

Irrigação por gotejamento subsuperficial no cultivo de *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Mombaça

A busca pela eficiência produtiva no cultivo de pastagens e pela elevação da qualidade do pasto demanda investimentos na intensificação da produção, o que implica na adoção de tecnologias, sendo uma delas a irrigação. Apesar dos sistemas de irrigação por aspersão serem os mais comumente utilizados no cultivo de pastagens irrigadas, é crescente o uso da irrigação por gotejamento subsuperficial – SDI em pastagens. Nesse sentido, o objetivo nesse estudo foi obter o potencial de resposta do *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Mombaça ao uso do SDI utilizando diferentes espaçamentos entre as linhas laterais de irrigação, ao longo de ciclos produtivos subsequentes. O estudo foi conduzido em área experimental do Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, no município de Piracicaba – SP de setembro/2019 a outubro/2020. Durante esse período, dados foram coletados e informações acerca da distribuição espacial e temporal da água no solo para diferentes espaçamentos de linhas laterais de irrigação, do desenvolvimento biométrico e produtivo da cultura, e da interação clima-pasto em pastagem irrigada por gotejamento subsuperficial foram geradas. O estudo foi conduzido sob delineamento experimental em blocos casualizados, cujos tratamentos foram quatro espaçamentos entre tubos gotejadores (S1 = 2,0 m; S2 = 1,5 m; S3 = 1,2 m; S4 = 1,0 m) em sete ciclos produtivos (C1, C2, C3, C4, C5, C6 e C7). Foram analisadas medidas de altura do dossel (AD), produtividade de matéria verde (MV), produtividade de matéria seca (MS), índice de área foliar (IAF), taxa de expansão da forragem (TEF) e produtividade de água (PA). O manejo da irrigação foi realizado via solo, com monitoramento do conteúdo de água no solo realizado via sonda capacitiva FDR – *Frequency Domain Reflectometry*, modelo Diviner 2000®, do fabricante Sentek. Foram realizadas valiações acima do dossel utilizando um sistema de aeronave não tripulada (UAS), modelo Matrice 600 Pro da DJI®, embarcado com uma câmera Altum da Micasense®, e o NDVI foi obtido para os diferentes espaçamentos utilizados ao longo do sétimo ciclo produtivo da cultura. Para os ciclos do período primavera/verão, houve efeito significativo dos espaçamentos entre tubos gotejadores para AD e TEF, sendo os maiores valores observados nos menores espaçamentos. Não houve efeito de espaçamento entre tubos gotejadores para MS nos ciclos 3, 5, 6 e 7. O capim Mombaça responde bem à irrigação por gotejamento subsuperficial, sendo possível obter boas respostas produtivas em espaçamentos entre tubos gotejadores superiores a 1,0 m.

Palavras-chave: Irrigação de pastagem, SDI, Forrageira tropical, Tecnologia na agricultura

ABSTRACT

Subsurface drip irrigation in the cultivation of *Megathyrsus maximus* (Guinea Grass.) cv. Mombaça

The search for efficiency in the forage-based systems and the improvement of the forage quality demands investments in the intensification of production, which implies the adoption of technologies, among them the irrigation. The irrigation systems most commonly used in pasture management is the sprinkler systems. However, lately, subsurface drip irrigation - SDI has also been used in pasture management. Thus, this study aimed to obtain the response potential of *Megathyrsus maximus* (Guinea Grass.) cv. Mombaça to the use of SDI. For this purpose, the crop was subjected to subsurface drip irrigation using different spacing between lateral drip lines over subsequent production cycles of the crop. The study was carried out in an experimental area of the Department of Agricultural Systems Engineering at the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", ESALQ/USP, in the city of Piracicaba, state of São Paulo, Brazil, from September/2019 to October/2020. During this period, the data were collected, and information was generated on the water spatial and temporal distribution in the soil for different spacing of lateral irrigation lines, the crop biometric and productive development, and the interactions between climate and grazing pasture irrigated by the SDI system. The experimental design was in randomized blocks considering four spacings between dripper tubes (S1 = 2.0 m; S2 = 1.5 m; S3 = 1.2 m; S4 = 1.0 m) and seven production cycles (C1, C2, C3, C4, C5, C6, and C7). Measurements of canopy height (CH), green matter productivity (GP), dry matter productivity (DM), leaf area index (LAI), forrage expansion rate (FER), and water productivity (WP) were made. Irrigation management was carried out via the soil, with monitoring of the water content in the soil carried made by capacitive probe FDR – Frequency Domain Reflectometry, Diviner 2000® model, Sentek. Evaluations above the sward were performed using an unmanned aerial vehicle (UAV), model Matrice 600 Pro from DJI®. On board the UAV, there was an Altum camera from Micasense®, and the NDVI was obtained for the different spacings used throughout the seventh crop cycle. For the crop cycles of the spring/summer period, there was an effect of spacing between the drip lines for CH, FER, with the highest values observed in the smallest spacings. There was no effect of spacing between drip lines for DM in the 3, 5, 6, and 7 crop cycles. Mombaça grass has good responses to subsurface drip irrigation, and it is possible to obtain good biometric and productive responses at the spacing between drip lines greater than 1.0 m.

Keywords: Pasture irrigation, SDI, Tropical forage, Technology in agriculture

1. INTRODUÇÃO GERAL

As projeções futuras de crescimento populacional e, conseqüentemente, de maior demanda por alimentos e por proteína animal convergem para a necessidade do aumento da produção, tanto por animal quanto por área, considerando o conceito da sustentabilidade. Esse é um resultado que pode ser alcançado em uma agricultura que envolve uso de tecnologias, tais como variedades melhoradas, manejo de ervas daninhas, fertilizantes, práticas adequadas no manejo de cultura e solo, além do manejo da irrigação, que consiste em um dos principais fatores que afetam a produtividade (SANDHU e IRMAK, 2022).

A pecuária é uma das principais atividades econômicas de várias regiões brasileiras e está diretamente relacionada à produção das pastagens, que compõem a base da alimentação da maioria dos rebanhos brasileiros nas cadeias produtivas da carne e leite (BRANDÃO, 2016). Aproximadamente 90% da produção de carne bovina no Brasil é realizada em sistema a pasto (RODRIGUES e MARTA-COSTA, 2021). Segundo a Associação Brasileira de Indústrias Exportadoras de Carne (ABIEC, 2022), a área de pastagens utilizada cresceu 0,2% em 2020, atingindo uma área de 165,2 milhões de hectares, com uma produtividade média de 4,2@ ha⁻¹ ano⁻¹. Ao fazer um recorte temporal do período compreendido entre os anos de 2006 e 2017, é constatado um aumento de 9,6% na área de pastagens plantadas, conforme apontam os resultados do censo agropecuário de 2017 (IBGE, 2017). Esses números evidenciam a importância do cultivo de pastagens no Brasil e, conseqüentemente, da geração de informações técnicas a respeito para a eficiência de sua utilização.

É crescente o investimento em produção de carne e leite a partir do cultivo intensivo de pastagens com práticas de manejo que incluem a adubação e a irrigação. A irrigação de pastagens tem sido desenvolvida no Brasil mais fortemente a partir de 1990 com a finalidade principal de aumentar a produção e a qualidade do pasto, possibilitando aumentar a produtividade média das forrageiras e a taxa de lotação animal (CUNHA *et al.*, 2012). É uma técnica que também contribui, em certa medida, para a elevação da produção nos períodos de estacionalidade, nos quais há uma redução na oferta de forragem.

Os sistemas de irrigação mais comumente utilizados em pastagens são os de aspersão. Entretanto, a adoção dos sistemas de irrigação localizada tem aumentado consideravelmente, sobretudo em razão dos benefícios que a técnica oferece. Entre esses benefícios estão a maior eficiência da irrigação do sistema, a redução das perdas de água por evaporação e arraste pelo vento, e o menor requerimento de potência da bomba por área irrigada (cv ha⁻¹). No contexto da irrigação localizada, a irrigação por gotejamento subsuperficial, SDI - subsurface drip irrigation, tem ganhado evidência recentemente, especialmente por garantir um melhor aproveitamento da água, com emissores localizados abaixo da superfície do solo e próximos ao sistema radicular. É uma técnica que vem sendo implementada mundialmente em diversos cultivos, principalmente em regiões com altos índices de evapotranspiração e alta restrição hídrica (AYARS *et al.*, 2015; LAMM *et al.*, 2021). Um dos principais desafios nesse sistema é a definição do espaçamento e da profundidade dos tubos gotejadores, sendo necessários estudos que abordem a interação dessas características no SDI com uma cultura e seu desenvolvimento, incluindo profundidade, espaçamento e vazão do emissor (LAMM *et al.*, 2021).

Entre as forrageiras tropicais mais cultivadas no Brasil estão as cultivares de *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum* Jacq.), que são forrageiras de origem africana propagadas por sementes. São altamente produtivas e bem recomendadas para sistemas de pecuária intensiva (JANK *et al.*, 2008; LANDAU *et al.*, 2020). Entre suas cultivares, destaca-se o capim Mombaça, de utilização comum em sistemas de produção animal e que apresenta elevada produtividade e valor nutritivo. No seu cultivo intensivo geralmente tem-se utilizado a irrigação por

aspersão. Já na configuração de cultivo irrigado por gotejamento subsuperficial, registros técnicos referentes ao capim Mombaça são exíguos, sendo assim oportuna a realização de estudos sobre seu cultivo nesse tipo de sistema.

A obtenção do potencial de resposta de uma determinada cultura submetida a uma configuração específica de cultivo envolve informações relacionadas ao sistema solo-planta-atmosfera. Tais informações são alcançadas a partir de observações, análises, uso de tecnologias e da determinação ou estimativa de variáveis e índices relacionados ao clima, à cultura e ao solo. Há uma tendência de aumento do uso do SDI em pastagens irrigadas, o que demanda informações fundamentais de projeto, tais como profundidade de instalação e espaçamento adequado entre os tubos gotejadores (LAMM *et al.*, 2021). Adicionalmente, em pastagens irrigadas é fundamental obter informações da distribuição espacial e temporal da água no solo, do desenvolvimento biométrico e produtivo da cultura e da interação clima-pasto. Em suma, o levantamento de dados e a realização de estudos relacionados ao desenvolvimento de pastagens irrigadas por gotejamento subsuperficial podem contribuir para a tomada de decisão e potencializar a busca por melhores métodos que resultem em índices satisfatórios de produtividade aliado ao uso racional da água.

Nesse contexto, a hipótese desse trabalho é a de que a irrigação por gotejamento subsuperficial em pastagens permite obter bons índices produtivos sob um espaçamento ótimo utilizado entre tubos gotejadores.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral neste trabalho foi a obtenção do potencial de resposta do *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Mombaça submetido ao uso da tecnologia de irrigação por gotejamento subsuperficial com diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores.

1.2. Objetivos específicos

- Obter índices de desenvolvimento biométrico do *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial sob diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores;
- Determinar a produtividade do *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial sob diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores;
- Obtenção da distribuição espacial e temporal da água no solo em um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial;
- Obtenção do normalized difference vegetation index – NDVI ao longo do crescimento do *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial sob diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE (Brasil). Perfil da pecuária no Brasil 2021. Abiec, 2022.
- AYARS, J. E.; FULTON, A.; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California – Here to stay? *Agricultural Water Management*. 157, 39 – 47, 2015.
- BRANDÃO, D. Produção e trocas gasosas do capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaça) cultivado sob diferentes níveis de depleção de água no solo. 2016. 84f. Tese (Doutor em Ciências). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- CUNHA, F. F.; RAMOS, M. M.; ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CECON, P. R.; ARAÚJO, R. A. S. Produtividade da *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés em diferentes manejos e doses de adubação, períodos de descanso e épocas do ano. *Idesia (Chile)* v.30, n.1, jan-abril, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). Censo Agropecuário, 2017. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em 09 mar. 2019.
- JANK, L. RESENDE, R. M. S.; VALLE, C. B.; RESENDE, M. D. V.; CANÇADO, L. J.; SIMIONI, C. Melhoramento genético de *Panicum maximum*. *Melhoramento de forrageiras tropicais*, v.1, p. 55 – 87, 2008.
- LAMM, F. R.; COLAIZZI, P. D.; SORENSEN, R. B.; BORDOVSKY, J. P.; DOUGHERTY, M.; BALKCOM, K.; ZACCARIA, D.; BALI, K. M.; RUDNICK, D. R.; PETERS, R. T. A 2020 vision of subsurface drip irrigation in the U.S. *Transactions of the ASABE*, 66(4), 1319-1343. 2021. <https://doi.org/10.13031/trans.14555>
- LANDAU, E. C.; SIMEÃO, R. M.; MATOS NETO, F. C. Evolução da área ocupada por pastagens. In: LANDAU, E. C.; SILVA, G. A. da; MOURA, L.; HIRSCH, A.; GUIMARAES, D. P. (Ed.). *Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem animal e da silvicultura*. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 3, cap. 46, p. 1555-1578.
- RODRIGUES, L. M. S.; MARTA-COSTA, A. A. Competitividade das exportações de carne bovina do Brasil: uma análise das vantagens comparativas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 59(1), 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.238883>
- SANDHU, R.; IRMAK, S. Effects of subsurface drip-irrigated soybean seeding rates on grain yield, evapotranspiration and water productivity under limited and full irrigation and rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 267, 2022.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação de pastagens

A principal fonte alimentar para animais em pastejo é a pastagem que, por sua vez, se apresenta como a forma mais barata de produzir alimento na pecuária (CUNHA, 2015; MICHALK *et al.*, 2019). Ao intensificar a produção a pasto, os investimentos em tecnologia aumentam, o que pode contemplar a adubação e a irrigação de pastagens.

A irrigação de pastagens apresentou um crescimento acentuado no Brasil a partir da década de 1990, suscitando uma maior demanda por informações a respeito (ALENCAR *et al.*, 2009; CUNHA *et al.*, 2012). É uma técnica que modifica o ambiente visando otimizar o sistema de produção, tendo por principal finalidade aumentar a qualidade das pastagens e sua produtividade em arrobas de carne ou em litros de leite por hectare, possibilitando aumentar o rebanho e a taxa de lotação animal (CUNHA *et al.*, 2012; ALVES *et al.*, 2021). É uma técnica que também contribui, em certa medida, para a produção nos períodos de estacionalidade, períodos nos quais há uma redução na oferta de forragem em razão da associação de baixas temperaturas, curtos fotoperíodos e déficit hídrico (REIS *et al.*, 2017; DRUMOND E AGUIAR, 2005).

O desenvolvimento da pastagem é afetado pelas condições climáticas e pelo manejo do pasto (Araújo *et al.*, 2018). Estudos apontam para bons resultados produtivos obtidos com a irrigação de pastagens. Oliveira Filho *et al.* (2011) registraram um aumento de 50% na produtividade do capim Xaraés, *Urochloa brizantha* sob irrigação com uma lâmina correspondente a 120% da evapotranspiração de referência (ET_o), no município de Gurupi – TO. Mochel Filho *et al.* (2016) irrigaram o capim Mombaça em Parnaíba – PI e obtiveram melhores respostas de produtividade, composição bromatológica e viabilidade econômica para uma lâmina correspondente a 50% da evaporação do tanque “classe A” – ECA associada a uma aplicação de 800 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N. Melo *et al.*, (2020) obtiveram um incremento de 70,3% na produção do capim Marandu, *Urochloa brizantha*, irrigado com uma lâmina correspondente a 125% da ET_o. Resultados como esses presentes na literatura evidenciam a prática da irrigação no cultivo de pastagens e seu efeito positivo na produtividade das forrageiras tropicais.

O uso da irrigação no cultivo de pastagens possibilita a realização da fertirrigação. Essa é uma prática que consiste na aplicação de fertilizantes via água de irrigação, garantindo um melhor aproveitamento e uso racional desses recursos. Para as forrageiras tropicais, a fertirrigação proporciona o alcance de produtividades consideravelmente altas, chegando a alcançar uma produtividade anual de 40 a 60 toneladas de matéria seca por hectare, suportando de 8 a 12 unidades animais por hectare, UA ha⁻¹ (DRUMOND *et al.*, 2021). De acordo com Drumond e Aguiar (2005), a irrigação e a fertirrigação aumentam o custo total de um sistema de pastagens, mas esse aumento de custo é parcialmente compensado pela redução nos custos com adubação, tendo em vista a economia de mão-de-obra e de maquinário que deixa de ser utilizado para tal finalidade. Além disso, a fertirrigação possibilita um maior parcelamento e melhor controle da aplicação de nutrientes.

O método de irrigação mais utilizado nos cultivos de forragem no Brasil é o de aspersão, por sistema convencional e por pivô central, havendo também pastagens irrigadas com autopropelido (ALENCAR *et al.*, 2009; DRUMOND *et al.*, 2021). Por outro lado, a adoção dos sistemas de irrigação localizada no cultivo de pastagens tem aumentado. Considerando que no âmbito da agricultura irrigada busca-se a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis, o investimento em sistemas de irrigação mais eficientes aumentou e a expansão da utilização de sistemas de irrigação localizada tem alcançado também o cultivo de pastagens. Áreas com pastagens irrigadas por gotejamento

subsuperficial são encontradas, principalmente, em regiões de clima semiárido e naquelas com grande competição pelo uso de água (DRUMMOND *et al.*, 2021).

2.2. Irrigação localizada

O método da irrigação localizada surgiu em Israel na década de 1960 e, desde então, vem sendo aprimorado e utilizado em diversos países (MARQUES *et al.*, 2012). Tem grande potencial para a irrigação de precisão e se adapta a diversas condições de cultivo, clima, topografia e solos (FRIZZONE *et al.*, 2012). Seu uso vem aumentando consideravelmente em âmbito mundial. No Brasil, estimativas da Agência Nacional das Águas e saneamento Básico – ANA (2017) apontam para uma maior participação da irrigação localizada nas demandas da agricultura irrigada até 2030. Seu desenvolvimento junto à expressiva competitividade do agronegócio brasileiro tem impulsionado sua utilização em várias culturas (BERNARDO *et al.*, 2006; FRIZZONE *et al.*, 2012).

A irrigação localizada caracteriza-se pela aplicação de água em menor volume e em maior frequência, com maior eficiência, próximo ou dentro da zona radicular da cultura (FRIZZONE *et al.*, 2012; FU *et al.*, 2021). Por trabalhar em baixas pressões, requer menor potência da bomba por área (cv ha^{-1}) que os sistemas de aspersão. A aplicação da água se dá por meio de tubos perfurados com orifícios de diâmetros reduzidos ou por emissores – gotejadores e microaspersores (BERNARDO *et al.*, 2019). Os emissores são dimensionados para dissipar a energia de pressão da água e aplicar uniformemente pequenas vazões em forma de gotas. Tecnicamente, é um sistema que trabalha com baixa pressão de operação, baixas vazões e com turnos de rega de, no máximo, quatro dias (FRIZZONE *et al.*, 2012).

No âmbito da irrigação localizada, um dos sistemas que tem ganhado evidência é o de irrigação localizada por gotejamento subsuperficial, SDI – subsurface drip irrigation, sobretudo frente à crescente busca por tecnologias que possibilitem o aumento da eficiência no uso da água.

2.3. Irrigação por gotejamento subsuperficial

A Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas e Biológicos – ASABE define a irrigação por gotejamento subsuperficial - SDI como a “aplicação de água abaixo da superfície do solo por meio de emissores, em que a faixa de vazão utilizada é a mesma da irrigação por gotejamento superficial”. Para Marques *et al.* (2012) e Testezlaf (2017), a irrigação por gotejamento subsuperficial consiste na aplicação de água abaixo da superfície do solo, com emissores localizados próximo ao sistema radicular da cultura, proporcionando uma maior eficiência do uso de água.

Essa tecnologia foi desenvolvida no início dos anos de 1960 nos Estados Unidos, com crescente interesse a partir de 1980 (CAMP, 1998). É um sistema já utilizado em vários outros países, além dos Estados Unidos, entre eles: Israel, Índia, China, Austrália e Brasil (MARQUES *et al.*, 2012; MO *et al.*, 2017). Diversas culturas respondem positivamente ao uso do SDI (LAMM e CAMP, 2007), tais como café, citros, mamão, melão, tomate, feijão, soja, milho, cana-de-açúcar e pastagem. Na Califórnia, por exemplo, o investimento na irrigação localizada subsuperficial ocorre há mais de 30 anos, com uso inicial em culturas anuais e, atualmente, também em culturas perenes (AYARS *et al.*, 2015).

O manejo da água no SDI visa promover o movimento lateral e ascendente da água, minimizar a lixiviação da zona radicular e, como resultado, manter o solo nos níveis de umidade corretos, eliminando a possibilidade de estresse hídrico pela cultura (LAMM e CAMP, 2007). A configuração desse sistema favorece a prática da fertirrigação, técnica que ocorre de forma mais eficiente no SDI do que em outros sistemas de irrigação, possibilitando o manejo combinado de água e nutrientes (LAMM e CAMP, 2007; REIS *et al.*, 2017). A aplicação dos nutrientes pode se dar de forma parcelada e na mesma frequência da irrigação. Nos Estados Unidos, Israel e Itália, essa técnica é de uso generalizado; no Brasil é a técnica mais adotada pelos produtores que fazem uso do sistema de irrigação localizada (SOARES, 2009). Apesar da alta eficiência e uniformidade de aplicação que podem ser alcançadas no SDI, a umidade ao longo da zona radicular da cultura depende das propriedades hidráulicas do solo (SKAGGS *et al.*, 2010).

Os sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial são compostos por gotejadores autocompensantes e que contêm dispositivos anti-sucção. A tecnologia autocompensante permite a manutenção de uma vazão relativamente constante dos emissores sob uma faixa de variação de pressão especificada pelo fabricante. Isso decorre de uma restrição na passagem da água pelo orifício de saída do emissor causada por uma membrana flexível de borracha que se deforma ao ser submetida à pressão da água. Geralmente, a faixa de variação de pressão em que a vazão se mantém relativamente constante nos gotejadores autocompensantes está entre 50 e 400 kPa (FRIZZONE *et al.*, 2012). O dispositivo anti-sucção impede a sucção da solução do solo para dentro da tubulação, devido à pressão negativa, pois as partículas sólidas poderiam obstruir os gotejadores.

Diversos benefícios podem ser apontados com o uso da irrigação por gotejamento subsuperficial, entre eles: capacidade de aplicar baixos volumes de água nas raízes das plantas, melhoria na qualidade das culturas, garantia de distribuição de nutrientes na zona radicular da cultura, redução do volume de água aplicado por área, eliminação do escoamento superficial e redução dos custos agrônômicos voltados ao controle de ervas daninhas e à adubação (AYARS *et al.*, 2015; GAO *et al.*, 2014). Com relação aos efeitos de uso do SDI na produção da cultura e na produtividade da água, esses dependem do manejo adotado, das condições climáticas locais e das propriedades do solo (WANG *et al.*, 2022). Estudos demonstram que, se o sistema for bem projetado, instalado, operado e mantido adequadamente, a irrigação por gotejamento subsuperficial resulta em culturas de alto rendimento, em reduções substanciais no volume de água utilizado na irrigação e na redução da evaporação de água do solo na camada superficial (SANDHU e IRMAK, 2022). Camp (1998) cita vários estudos desenvolvidos entre os anos de 1981 e 1997 nos quais os rendimentos alcançados por diversas culturas irrigadas por gotejamento subsuperficial foram iguais ou melhores que os resultados obtidos com outros sistemas de irrigação.

O fato de as linhas laterais estarem enterradas no gotejamento subsuperficial também é uma vantagem quanto à variação de vazão que pode ocorrer devido ao aumento na temperatura da água utilizada em sistemas de irrigação expostos à radiação solar. Na microirrigação, a temperatura da água no sistema é afetada pela temperatura do ar e pela temperatura do solo em torno da linha lateral. Na irrigação por gotejamento superficial, as linhas laterais estão expostas à radiação solar e o aumento na temperatura da água pode chegar a 17°C, o que pode resultar em variação na vazão dos emissores (FRIZZONE *et al.*, 2012). Como benefício adicional do uso do SDI, há uma redução nos custos de energia decorrente de pressões operacionais mais baixas em comparação com a irrigação por aspersão (AYARS *et al.*, 2015).

Por ser um sistema enterrado, a obstrução dos gotejadores por intrusão radicular, precipitados químicos ou partículas sólidas do solo pode ser recorrente e comprometer a uniformidade da distribuição de água na irrigação. As medidas preventivas para evitar obstruções e garantir uma boa operacionalidade do sistema incluem um bom

sistema de filtragem, controle do pH da água, aplicação de substâncias ácidas, injeção de cloro e a limpeza frequente nos finais de linha (AYARS *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2012). Resultados satisfatórios e mais recentes relacionados ao uso do SDI em diferentes culturas podem ser verificados nos estudos de Cunha *et al.* (2016), Gao *et al.* (2014), Silva *et al.* (2014) e Sousa *et al.* (2013).

Na instalação do SDI, a profundidade utilizada para as linhas laterais de gotejamento depende de vários fatores, o que engloba características do solo e do sistema radicular da cultura a ser cultivada, sendo os valores mais utilizados aqueles encontrados na faixa entre os 0,15 e 0,30 m (LAMM e CAMP, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2013). Com relação à distribuição das linhas laterais, assim como na variável profundidade, deve-se atentar sobretudo para as características do solo e da planta. De acordo com Camp (1998) e Devasirvatham (2009), o espaçamento entre as linhas laterais varia de 0,25 a 5,0 m, dependendo da cultura irrigada, das características do solo e das práticas culturais. Kuns *et al.* (2014) relatam haver poucos estudos na literatura sobre o efeito de diferentes profundidades e espaçamentos entre linhas laterais em sistemas de gotejamento subsuperficial. Melo (2018) avaliou o crescimento e a produtividade de *Brachiaria brizantha* (Syn. *Urochloa brizantha*) cv. Marandu irrigada por gotejamento subsuperficial e mencionou a ausência de estudos que abordem recomendações de espaçamento entre os tubos gotejadores para pastagens semeadas a lanço. A demanda de informações e recomendações técnicas quanto ao uso do SDI decorre da notoriedade que esse sistema vem ganhando na agricultura irrigada. De acordo com Ayars *et al.* (2015), estudos que abordem sua utilização em novas culturas podem contribuir para a expansão da tecnologia.

2.4. *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum*) cv. Mombaça

Em países tropicais, as pastagens estão na base da pecuária, consistindo na alimentação de animais nos sistemas de produção de carne e leite, tendo sua importância também na produção de energia e na promoção do sequestro de carbono (MORENO *et al.*, 2014).

Plantas forrageiras, em sua maioria, pertencem às famílias botânicas Poaceae (Gramineae) e Fabaceae (Leguminosae). A família Poaceae se destaca com relação ao quantitativo de espécies e gêneros, sendo os gêneros *Paspalum*, *Panicum*, *Axonopus* e *Digitaria* os que englobam o maior número de espécies (PINTO e ÁVILA, 2013). O *Panicum maximum* Jacq., planta C4, é uma importante espécie forrageira amplamente utilizada na produção de gado nas zonas climáticas tropicais e subtropicais (VICIEDO *et al.*, 2019). No Brasil, cultivares de *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum*) estão entre as forrageiras tropicais mais cultivadas, sendo as forrageiras propagadas por sementes mais produtivas no mercado nacional (JANK *et al.*, 2008). Apresentam boa adaptação em solos leves, de média a alta fertilidade e, devido a suas características, são forrageiras recomendadas para sistemas de pecuária intensiva (VALLE JÚNIOR *et al.*, 2009).

Entre suas cultivares, destaca-se o capim Mombaça, de utilização comum em sistemas de produção animal e que apresenta elevada produtividade e valor nutritivo. Essa cultivar é classificada como BRA-006645 e foi lançada pela Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte (CNPGC), de Campo Grande, MS, em 1993 (JANK *et al.*, 2008). De origem africana, é uma planta ereta e cespitosa, com altura máxima média de 1,65 m, folhas com largura média de 3,0 cm, sem cerosidade e quebradiças. Por ser uma gramínea do tipo C4, possui fixação de carbono mais eficiente em temperaturas entre 30 e 40°C (SILVEIRA e PEREZ, 2014; YAMORI *et al.*, 2014), alcançando altos potenciais de produção de massa seca em ambientes subtropicais e tropicais. No entanto, é uma cultura sujeita à

estacionalidade de produção, que pode ocorrer devido às baixas temperaturas, baixo fotoperíodo e deficiência hídrica (CARNEVALLI, 2003; BRANDÃO, 2016).

No contexto da irrigação, Ribeiro *et al.* (2009) avaliaram a influência dessa tecnologia no cultivo de capim Mombaça em um ano de estudo e obtiveram maior produção de biomassa, proporção de folhas, altura e densidade volumétrica quando a forrageira foi submetida à irrigação. Alencar *et al.* (2009) estudaram a produção de forrageiras irrigadas no estado de Minas Gerais e constataram que a irrigação contribuiu para o aumento da produtividade de matéria seca do capim Mombaça na estação outono/inverno.

2.5. Uso de tecnologias na irrigação e no manejo de pastagens

No cenário de modernização da agricultura tem se efetivado o uso de tecnologias digitais visando a geração de dados e de informações assertivas relacionadas a um determinado processo agrícola. No manejo da irrigação, diferentes ferramentas tecnológicas têm sido exploradas possibilitando o uso inteligente da água, termo diretamente associado à irrigação de precisão, ao passo que essas ferramentas permitem a geração de informação em maior frequência e volume de dados do sistema solo-planta-atmosfera.

Ações relacionadas à agricultura de precisão têm como base a variabilidade no espaço e no tempo da unidade produtiva (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Associada a esse conceito, a irrigação de precisão consiste na integração de dados e informação para obter a otimização do uso da água, considerando a variabilidade espacial e temporal do solo, respostas das culturas ao déficit hídrico e mudança das variáveis climáticas, o que resulta em diferentes zonas de manejo em uma determinada área, cada uma com suas respectivas necessidades hídricas (ABIOYE *et al.*, 2020). De acordo com Aleotti *et al.* (2018), a irrigação de precisão é uma estratégia para o uso racional de água baseando-se na medição da variabilidade espacial das propriedades do solo bem como das respostas das culturas. Conforme Coelho (2021), a na irrigação de precisão tem-se as tecnologias da agricultura de precisão de sequeiro somadas à aplicação de água em taxa variável no campo, com aplicabilidade em sistemas de irrigação pressurizada.

O conceito de agricultura de precisão pode ser também aplicado às pastagens resultando em um cenário no qual tecnologias de sensoriamento remoto são utilizadas no monitoramento de áreas cultivadas, gerando dados e informações precisas, possibilitando a obtenção de bons resultados nos sistemas de produção a pasto (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Na intensificação da produção a pasto, tem-se a junção de técnicas, ferramentas, equipamentos e processos que, ao final, possibilitam uma tomada de decisão mais assertiva e uma produção mais eficiente.

Como tecnologias utilizadas no suporte à decisão em um sistema de produção agrícola estão as imagens de satélite, multiespectrais e térmicas captadas a partir de sensores. Imagens de satélite integradas a sistemas de monitoramento inteligente em campo geram dados que, por sua vez, geram informações técnicas que facilitam a tomada de decisão do produtor irrigante (DRUMMOND *et al.*, 2021). Nos processos de tomadas de decisão na agricultura irrigada, a utilização de imagens de satélite tem sua importância como recurso complementar na gestão da irrigação (ALFACE *et al.*, 2019). A partir de diferenças detectadas na reflectância de uma dada cobertura vegetal nas diferentes bandas do espectro eletromagnético, inferências sobre o vigor da vegetação podem ser feitas mediante o cálculo de índices de vegetação (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Os índices de vegetação consistem em modelos matemáticos utilizados para medir a reflectância da vegetação visando obter a taxa fotossintética do vegetal com base na sua cobertura (PASSOS, 2021). O índice de vegetação de diferença normalizada – NDVI é um dos índices de vegetação mais utilizados na agricultura, sobretudo como um indicador que se correlaciona com a biomassa, teor de clorofila, além de outros parâmetros da vegetação

(RASMUSSEN *et al.*, 2016). É um índice que considera as propriedades reflexivas da vegetação fotossinteticamente ativa, obtido a partir da relação entre a refletância do dossel nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, com valores variando de -1 a 1, de modo que quanto mais próximo de 1, maior a quantidade de vegetação no local observado e maior o seu vigor vegetativo. Por outro lado, valores mais próximos de zero indicam menor atividade de clorofila ou solo descoberto, já valores negativos indicam corpos d'água ou neve (BARRACHINA *et al.*, 2015; CORDEIRO *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2023).

De acordo com Gao *et al.* (2017), o monitoramento do ciclo produtivo de uma cultura fornece informações necessárias para o manejo eficiente da irrigação, possibilitando que as lâminas aplicadas sejam moduladas em função do estágio de desenvolvimento da cultura, além de possibilitar a estimativa do rendimento do cultivo irrigado. Os autores exploraram relações entre métricas fenológicas, geradas a partir de dados de sensoriamento remoto, e estágios fisiológicos de crescimento para soja e milho observados no solo, utilizando séries temporais de NDVI na detecção de estágios verdes e senescentes. De acordo com Rasmussen *et al.* (2016), índices de vegetação baseados em imagens de veículos aéreos não tripulados – UAV têm a mesma capacidade de obtenção e quantificação de respostas das culturas aos tratamentos experimentais quando comparados com gravações realizadas a nível do solo com câmeras e sensores avançados.

No contexto das pastagens, o NDVI tem sido muito utilizado na identificação de áreas com pastagens degradadas, sendo possível de fazer levantamentos em escalas regionais e globais (VALLE JÚNIOR *et al.*, 2019; PASSOS, 2021; QUINAIA *et al.*, 2021). Seu uso tem aplicabilidade também na estimativa de produção de forragem (PORTER *et al.*, 2014; BARRACHINA *et al.*, 2015; PINGUELLO *et al.*, 2020).

Referências

- ABIOYE, E. A.; ABIDIN, M. S. Z.; MAHMUD, M. S. A.; BUYAMIN, S.; ISHAK, M. H. I.; RAHMAN, M. K. I. A.; OTUOZE, A. O.; ONOTU, P.; RAMLI, M. S. A. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 2020. 105441
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (Brasil). Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada. Brasília: ANA, 2017.
- ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CUNHA, F. F.; FIGUEIREDO, J. L. A. Produção de capins cultivados sob pastejo em diferentes lâminas de irrigação e estações anuais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.13, n.6, p.680-686, 2009.
- ALEOTTI, J.; AMORETTI, M.; NICOLI, A.; CASELLI, S., 2018. A smart precision-agriculture platform for linear irrigation systems. In: 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). University of Split, FESB, pp. 1–6.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE (Brasil). Perfil da pecuária no Brasil 2021. Abiec, 2022.
- ARAÚJO, L. C.; SANTOS, P. M.; RODRIGUEZ, D.; PEZZOPANE, J. R. M. Key factors that influence for seasonal production of Guinea grass. *Scientia Agrícola*, v.75, n.3, p.191-196, May/June 2018.
- AYARS, J. E.; FULTON, A.; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California – Here to stay? *Agricultural Water Management*. 157, 39 – 47, 2015.
- BARRACHINA, M.; CRISTÓBAL, J.; TULLA, A. F. Estimating above-ground biomass on mountain meadows and pastures through remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 184–192, 2015.

- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. Viçosa: Ed. UFV, 2006.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. Manual de irrigação. 9 ed. Viçosa, MG: UFV, 2019. 545p.
- BRANDÃO, D. Produção e trocas gasosas do capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaça) cultivado sob diferentes níveis de depleção de água no solo. 2016. 84f. Tese (Doutor em Ciências). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- CARNEVALLI, R.A. Dinâmica da rebrotação de pastos de Capim- Mombaça submetidos a regimes de desfolhação intermitente. 2003. 136f. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência Animal e Pastagens), Piracicaba, ESALQ.
- COELHO, R. D. A revolução azul no contexto da agricultura irrigada. In: Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: Técnica e Cultura. Esalq – USP, 2021.
- CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; MELO, R. W.; SHIMABUKURO, Y. E.; FIOR, C. S. Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. *Ciência Florestal*, 27, 2017.
- CUNHA, F. F.; RAMOS, M. M.; ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CECON, P. R.; ARAÚJO, R. A. S. Produtividade da *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés em diferentes manejos e doses de adubação, períodos de descanso e épocas do ano. *Idesia (Chile)* v.30, n.1, jan-abril, 2012.
- CUNHA, F. N.; SILVA, N. F.; SOUSA, A. E. C.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; VIDAL, V. M. Yield of sugarcane submitted to nitrogen fertilization and water depths by subsurface drip irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.20, n.9, p.841 – 846, 2016.
- DEVASIRVATHAM, V. A review of subsurface drip irrigation in vegetable production. Cooperative Research Centre for Irrigation Futures – Irrigation Matters Series, n. 03/09, 2009.
- DRUMOND, L. C. D.; AGUIAR, A. P. A. Irrigação de pastagem. Uberaba, 2005.
- DRUMOND, L. C. D.; MENDONÇA, F. C.; ANDRADE, A. S.; APPELT, M. F.; AMORIM, D. M. Irrigação de pastagens. In: Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: Técnica e Cultura. Esalq – USP, 2021.
- FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. Maringá: Eudem, 2012.
- FU, B.; LI, Z.; GAO, X.; WU, L.; LAN, J.; PENG, W. Effects of subsurface drip irrigation on alfafa (*Medicago sativa* L.) growth and soil microbial Community structures in arid and semi-arid areas of northern China. *Applied Soil Ecology*, 159, 2021.
- GAO, Y.; YANG, L.; SHEN, X.; LI, X.; SUN, J.; DUAN, A.; WU, L. Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 146, 1 – 10, 2014.
- GAO, F.; ANDERSON, M. C.; ZHANG, X.; YANG, Z.; ALFIERI, J. G.; KUSTAS, W. P.; MUELLER, R.; JHONSON, D. M.; PRUEGER, J. H. Toward mapping crop progress at field scales through fusion of Landsat and MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 188, 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). Censo Agropecuário, 2017. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em 09 mar. 2019.
- JANK, L. RESENDE, R. M. S.; VALLE, C. B.; RESENDE, M. D. V.; CANÇADO, L. J.; SIMIONI, C. Melhoramento genético de *Panicum maximum*. Melhoramento de forrageiras tropicais, v.1, p. 55 – 87, 2008.
- KUNS, J.; ÁVILA, V. S.; PETRY, M. Distribuição temporal e espacial da umidade do solo em sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial. *Revista Monografias Ambientais – REMOA*, v.13, n.5, dez., 2014.
- LAMM, F. R.; CAMP, C. R. Subsurface Drip Irrigation In: *Microirrigation for Crop Production*, Elsevier, 2007.

- LAMM, F. R.; COLAIZZI, P. D.; SORENSEN, R. B.; BORDOVSKY, J. P.; DOUGHERTY, M.; BALKCOM, K.; ZACCARIA, D.; BALI, K. M.; RUDNICK, D. R.; PETERS, R. T. A 2020 vision of subsurface drip irrigation in the U.S. *Transactions of the ASABE*, 66(4), 1319-1343. 2021. <https://doi.org/10.13031/trans.14555>
- LANDAU, E. C.; SIMEÃO, R. M.; MATOS NETO, F. C. Evolução da área ocupada por pastagens. In: LANDAU, E. C.; SILVA, G. A. da; MOURA, L.; HIRSCH, A.; GUIMARAES, D. P. (Ed.). *Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem animal e da silvicultura*. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 3, cap. 46, p. 1555-1578.
- MARQUES, P. A. A.; FRIZZONE, J. A.; TEIXEIRA, M. B. O estado da arte da irrigação por gotejamento subsuperficial. *Colloquium Agrarie*, v.2, n.1, mar. 2012, p.17 – 31.
- MELO, M. C. Irrigação em pastagens por gotejamento subsuperficial e modelagem do movimento de água no solo. 2018. 94f. Dissertação (mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal de Viçosa.
- MO, Y.; LI, G.; WANG, D. A sowing method for subsurface drip irrigation that increases the emergence rate, yield, and water use efficiency in spring corn. *Agricultural Water Management*, 179, 288 – 295, 2017.
- MOCHEL FILHO, W. J. E.; CARNEIRO, M. S. S.; ANDRADE, A. C.; PEREIRA, E. S.; ANDRADE, A. P.; CÂNDIDO, M. J. D. S.; MAGALHÃES, J. A.; RODRIGUES, B. H. N.; SANTOS, F. J. S.; COSTA, N. L. Produtividade e composição bromatológica de *Panicum maximum* cv. Mombaça sob irrigação e adubação azotada. *Revista de Ciências Agrárias*, 39 (1), 81 – 88, 2016.
- OLIVEIRA, A. R.; SIMÕES, W. L.; CALGARO, M. Espaçamento e profundidade do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial em cultivo de cana-de-açúcar. *Instruções Técnicas da Embrapa Semiárido*, Petrolina, dez., 2013.
- OLIVEIRA, L. D. S.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; CARMO, J. F. A.; SOUSA, L. S. B. Coeficiente de cultura da cana-de-açúcar submetida à irrigação subsuperficial no Submédio do Vale do São Francisco. *Anais. XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, Lavras – MG, 2012.
- OLIVEIRA FILHO, J. C.; OLIVEIRA, E. M.; OLIVEIRA, R. A.; CECON, P. R.; OLIVEIRA, R. M. CÓSER, A. C. Irrigação e diferentes doses de nitrogênio e potássio na produção do capim Xaraés. *Revista Ambiente & Água – Na Interdisciplinary Journal of Applied Science*: v.6, n.3, 2011.
- OLIVEIRA, P. S.; HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; OLIVEIRA, W. C. M. Aplicações da agricultura de precisão em pastagens. *Circular Técnica 127*, Embrapa, Juiz de Fora, MG, 2023. ISSN 1678-037X
- PASSOS, A. O. Índices de reflectância NDVI e EVI como indicadores de níveis de degradação das pastagens tropicais. 2021. 52f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do solo). Universidade Estadual Paulista – Unesp, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP.
- PINGUELLO, A. J. C.; TAMEIRÃO, E. R.; GONZAGA, P. H. A.; FERRANTE, M.; FERNÁNDEZ, F. E. Uso de índice de vegetação da diferença normalizada na estimativa de produção de forragem. *PubVet*, v. 14, n. 3, p. 1-7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v14n3a538.1-7>
- PORTER, T. F.; CHEN, C.; LONG, J. A.; LAWRENCE, R. L.; SOWELL, B. F. Estimating biomass on CRP pastureland: a comparison of remote sensing techniques. *Biomass and Bioenergy*, 66, 268 – 274, 2014.
- QUINAIA, T. L. S.; VALLE JÚNIOR, R. F.; COELHO, V. P. M.; CUNHA, R. C.; VALERA, C. A.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L. Application of an improved vegetation index based on the visible spectrum in the diagnosis of degraded pastures: implications for development. *Land Degradation & Development*, 32, 4693 – 4707, 2021.

- RASMUSSEN, J.; NTAOKOS, G.; NIELSEN, J.; SVENSGAARD, J.; POULSEN, R. N.; CHRISTENSEN, S. Are vegetation indices derived from consumer-grade câmeras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? *European Journal of Agronomy*, v. 74, p. 75-92, 2016.
- REIS, K. M.; BARRETO, A. C.; ZANINI, J. R. Vazão e uniformidade de distribuição de tubo gotejador em superfície e subsuperfície. *Irriga, Botucatu*, v.22, n.4, p. 690 – 700, out. – dez., 2017.
- REIS, M. M.; SANTOS, L. D. T.; OLIVEIRA, F. G.; SANTOS, M. V. Irrigação de pastagens tropicais: desafios e perspectivas. *Revista Unimontes Científica, Montes Claros*, v. 19, n.1 - jan./jun. 2017. (ISSN 2236-5257).
- RIBEIRO, E. G.; FONTES, C. A. A.; PALIERAQUI, J. G. B.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; SILVA, R. C. Influência da irrigação, nas épocas seca e chuvosa, na produção e composição química dos capins Napier e Mombaça em sistema de lotação intermitente. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, n.8, p. 1432 – 1442, 2009.
- RODRIGUES, L. M. S.; MARTA-COSTA, A. A. Competitividade das exportações de carne bovina do Brasil: uma análise das vantagens comparativas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 59(1), 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.238883>
- SANDHU, R.; IRMAK, S. Effects of subsurface drip-irrigated soybean seeding rates on grain yield, evapotranspiration and water productivity under limited and full irrigation and rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 267, 2022.
- SARAIVA, G. S.; BONOMO, R.; SOUZA, J. M. Perdas de água por evaporação e arraste pelo vento, em sistemas de aspersão fixa, Norte do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.7, n.4, p. 235 – 247, 2013.
- SILVA, N. F.; TEIXEIRA, M. B.; CUNHA, F. N.; SOARES, F. A. L. S.; OLIVEIRA, R. C. Desenvolvimento do pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.) em função da irrigação por gotejamento subsuperficial. *Revista Caatinga, Mossoró*, v.27, n.4, p. 85 – 94, out. – dez., 2014.
- SILVEIRA, M. C. T.; PEREZ, M. B. Informações sobre plantas forrageiras C4 para cultivo em condições de deficiência de drenagem e tolerância ao frio. Documentos 128. Embrapa Pecuária Sul, 2014.
- SIMÕES, W. L.; CALGARO, M.; COELHO, D. S.; SOUZA, M. A.; LIMA, J. A. Respostas de variáveis fisiológicas e tecnológicas de cana-de-açúcar a diferentes sistemas de irrigação. *Revista Ciência Agronômica*, v.46, n.1, p. 11 – 20, jan. – mar., 2015.
- SOARES, J. I. Lâminas de irrigação e posições das linhas gotejadoras, superficial e subsuperficial na cultura do melão. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem). 2009. 76f. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.
- SOUSA, A. C. M.; MATSURA, E. E.; ELAIUY, M. L. C.; SANTOS, L. N. S.; MONTES, C. R.; PIRES, R. C. M. Root system distribution of sugarcane irrigated with domestic sewage effluent application by subsurface drip system. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.33, n.4, p. 647 – 657, jul. – ago., 2013.
- SOUSA, W. J.; BOTREL, T. A.; COELHO, R. D.; NOVA, N. A. V. Irrigação localizada subsuperficial: gotejador convencional e novo protótipo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.8, p. 811 – 819, 2012.
- TESTEZLAF, R. Irrigação: métodos, sistemas e aplicações. Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 2017.
- VALLE, C. B.; JANK, L.; RESENDE, R. M. S. O melhoramento de forrageiras tropicais no Brasil. *Revista Ceres*, v.56, p. 460 – 472, 2009.
- VICIEDO, D. O.; PRADO, R. M.; MARTÍNEZ, C. A.; HABERMANN, E.; PICCOLO, M. C. Short-term warming and water stress affect *Panicum maximum* Jacq. stoichiometric homeostasis and biomass production. *Science of the Total Environment*, 681, p. 267 – 274, 2019.

ZACCARIA, D.; CARRILLO-COBO, M. T.; MONTAZAR, A.; PUTNAM, D. H.; BALI, K. Assessing the Viability of Sub-Surface Drip Irrigation for Resource-Efficient Alfalfa Production in Central and Southern California. *Water*, 9, 837, 2017. doi:10.3390/w9110837

YAMORI, W.; HOKOSAKA, K.; WAY, A. D. Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis Research*, 119, p. 101 – 117, 2014.

3. METODOLOGIA GERAL

3.1. Área de estudo

O experimento de campo foi conduzido em uma área experimental da ESALQ/USP, localizada em Piracicaba - SP, nas coordenadas 22° 42' 14,6" S e 47° 37' 21,2" O, com altitude média de 569 m (Figura 1). De acordo com a classificação de Koppen, o clima da região consiste no Cwa, subtropical úmido com inverso seco e verão quente (ALVARES *et al.*, 2013; DIAS *et al.*, 2017).

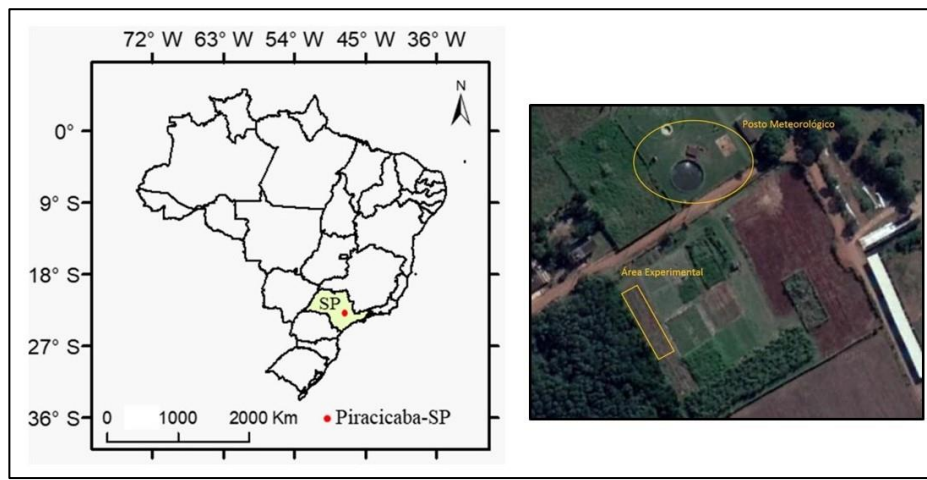


Figura 1. Área experimental da Esalq/USP, Piracicaba-SP.

O estudo foi realizado entre os meses de janeiro de 2019 a outubro de 2020, compreendendo desde as ações iniciais de preparo do solo e instalação do sistema de irrigação até a finalização do último ciclo da cultura, que consistiu no sétimo ciclo produtivo. Ao longo desse período de estudo, os dados das variáveis meteorológicas foram monitorados e obtidos na estação meteorológica automática da Esalq/USP, distante 50 m da área experimental.

3.2. Caracterização do solo da área experimental

O solo da área experimental foi classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico (EMBRAPA, 2006). Os valores de capacidade de campo, ponto de murcha permanente, ponto de saturação e densidade volumétrica foram obtidos pela curva de retenção de água no solo, conforme descrito por Prudente Júnior (2019). As tabelas 1 e 2 contêm, respectivamente, os dados referentes à caracterização química e física do solo.

Tabela 1. Características químicas do solo da área experimental.

Cam*	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S	CTC	V%	m%	S
	CaCl ₂		(resina)										SO ₄
	Cm	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----						V%	m%	mg dm ⁻³	
0-20	6,4	34	73,5	5,2	44,5	26,0	14,5	0	76	90,5	83,5	0	3,5
20-40	5,7	23	17,5	2,3	28,0	17,0	21,5	0	47,5	69,0	69,0	0	25,5
	Cu		Fe		Zn		Mn		B				(água quente)
		----- DTPA -----											
		----- mg/dm ³ -----											
0-20	4,1		11,4		2,9		32		0,3				
20-40	4		14,6		1,4		26,8		0,2				

* Cam: camada; MO: matéria orgânica; S: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação de bases; m%: saturação de alumínio.

Tabela 2. Características físicas do solo da área experimental.

Camada	PT	Ds	Argila	Silte	Areia
(m)	(cm ³ cm ⁻³)	(g cm ⁻³)	(%)	(%)	(%)
0-0,1	0,50	1,39	46,20	20,43	33,38
0,1-0,2	0,48	1,55	51,07	18,72	30,21
0,2-0,3	0,45	1,62	54,75	15,48	29,77
0,3-0,4	0,45	1,60	58,79	15,68	25,53
0,4-0,5	0,48	1,49	60,88	13,53	25,59
0,5-0,6	0,50	1,48	61,13	13,19	25,69
0,6-0,7	0,53	1,25	60,42	10,75	28,83
Média	0,48	1,48	56,18	15,40	28,43
Desvio Médio	0,02	0,09	4,72	2,49	2,42
C.V. (%)	4,55	6,33	8,40	16,18	8,52

PT: porosidade total; Ds: densidade do solo.

3.3. Sistema de irrigação

Em janeiro de 2019 foram realizadas ações de preparo do solo com grade aradora e enxada rotativa. Nos meses de junho e julho do mesmo ano foram realizadas as ações de instalação do sistema de irrigação, que consistiram em abertura de valas com uma minivaletadeira, distribuição dos tubos gotejadores e demais conexões, testes do sistema e fechamento das valas. O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento subsuperficial (Figura 2). O modelo do tubo gotejador foi o TopDrip PC AS 16 mm da Naandanjain, com profundidade de instalação de 0,20 m. A profundidade de instalação de 0,20 m para os tubos gotejadores reduz a percolação profunda, considerando a profundidade efetiva do sistema radicular de até 0,6 m (SANTOS *et al.*, 2016).

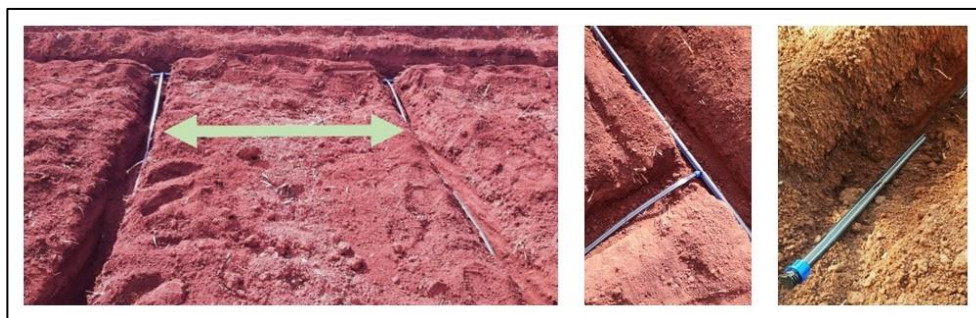


Figura 2. Instalação dos tubos gotejadores em um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial.

Os espaçamentos entre os tubos gotejadores utilizados foram 2,0 m (S1), 1,5 m (S2), 1,2 m (S3) e 1,0 m (S4). Para a utilização desses diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores e o cultivo da pastagem, foram utilizadas quatro áreas de 135 m². Os emissores foram do tipo autocompensantes e com dispositivos anti-sifão, espaçados a 0,50 m, com pressão máxima de trabalho de 18 mca, vazão nominal de 1,0 L h⁻¹ e com coeficiente de variação de vazão dos emissores, CV_q(F), de 3%. Para este índice, os valores associados a uma uniformidade excelente são aqueles inferiores a 5% (FRIZZONE *et al.*, 2012).

Os demais componentes do sistema consistiram em uma bomba centrífuga Thebe multiestágio modelo P-11/2 NR, com potência de 1,0 CV, um filtro de disco 1.½” 120 mesh, um sistema de fertirrigação composto por reservatório, injetor venturi, um filtro de disco ¾” 120 mesh, além de um controlador automático da Rainbird (figura 3).



Figura 3. Demonstração de alguns componentes utilizados no sistema de irrigação: bomba, filtros e controlador automático.

A água utilizada foi fornecida pelo serviço de abastecimento de água da ESALQ/USP, bombeada de um reservatório próximo à área experimental. Como medida preventiva para a intrusão radicular, em setembro de 2019 foi aplicada trifluralina, considerando a recomendação de aplicação de 0,5 gramas por emissor a cada seis meses (DALRI *et al.*, 2015).

Meses antes da instalação do sistema de irrigação, uma estrutura de carga hidráulica constante foi devidamente alocada na área experimental para verificar a formação do bulbo molhado no solo da área (Figura 4). A estrutura foi montada para atender as características de um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial com

vazão de 1 L h^{-1} . Foi considerado um tempo de aplicação de quatro horas, de maneira que o volume de água aplicado correspondesse à demanda hídrica de 4 mm d^{-1} . A água foi aplicada em profundidade de 0,20 m, correspondendo à profundidade de instalação das linhas laterais de irrigação. Pelo método da abertura de trincheira, as dimensões do bulbo na vertical e horizontal foram aferidas por fita métrica um dia após teste, conforme metodologia da Embrapa (2010). Desse modo, foram obtidos os valores para DM (diâmetro máximo), PM (profundidade máxima), AA (ascensão da água) e $DZ_{\text{máx}}$ (profundidade na qual se verificou o DM).



Figura 4. Ensaio para formação de bulbo molhado em um Nitossolo Vermelho eutroférico Latossólico com aplicação de água a 0,20 m de profundidade.

O bulbo molhado formado apresentou um diâmetro máximo de 0,41 m em uma profundidade de 0,30 m. Com relação à ascensão capilar da água, foi registrado um valor de 0,13 m, o que permite inferir que o avanço da frente de umedecimento em um Nitossolo Vermelho é maior no sentido horizontal. Os resultados podem depender da vazão do gotejador, conforme demonstrado por Barros *et al.* (2009), em trabalho similar realizado na mesma área experimental.

3.4. Semeadura e estabelecimento do Mombaça

O *Megathyrus maximus* (Syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Mombaça foi semeado e submetido aos diferentes espaçamentos entre os tubos gotejadores ao longo de sete ciclos produtivos, englobando a estação seca e a estação das águas. A semeadura foi realizada a lanço em setembro de 2019, com uma densidade de semeadura de 15 kg ha^{-1} . Durante o período de germinação, um sistema secundário de irrigação por aspersão foi utilizado até que a cultura atingisse uma altura de 0,8-0,15 m. O período de estabelecimento da cultura foi finalizado em 22/01/2020, com a realização do corte de uniformização mediante o uso de uma roçadeira elétrica para início do primeiro ciclo produtivo da cultura, mantendo uma altura de resíduo sempre após os cortes de 0,35 m (PEDREIRA *et al.*, 2014). A altura de resíduo corresponde à biomassa remanescente pós-colheita. Araújo *et al.* (2018) observaram que durante a rebrota do Mombaça, a produção de matéria seca é mais fortemente relacionada à biomassa remanescente até um acumulado térmico de 500°C , após esse limite a produção de matéria seca é mais correlacionada aos graus-dias.

Adubações de estabelecimento e cobertura foram realizadas com o equivalente a 50 e 80 kg ha⁻¹ de N nos períodos de outono/inverno e primavera/verão, respectivamente. A adubação nitrogenada possibilita o crescimento das plantas, o aumento da área fotossintética e, conseqüentemente, maiores produções de matéria seca (MOCHEL FILHO *et al.*, 2016). Os intervalos de colheita foram fixados em ciclos de 28 dias para o período de primavera/verão e de 42 dias para o período de outono/inverno, totalizando sete ciclos produtivos, com a última colheita realizada em 21/10/2020. De acordo com Pedreira *et al.* (2014), o período que abrange as estações primavera e verão, chamado de “verão agrostológico”, apresenta as melhores condições climáticas para o crescimento da forragem.

3.5. Sonda capacitiva FDR e manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado via solo, com monitoramento do conteúdo de água no solo feito a cada dois dias, momentos antes da irrigação. Para esse monitoramento, foi utilizada uma sonda capacitiva FDR – Frequency Domain Reflectometry, modelo Diviner 2000®, do fabricante Sentek. Sensores capacitivos têm sido utilizados no manejo de irrigação em diferentes tipos de solos e culturas (SANTOS *et al.*, 2016; GONÇALVES *et al.*, 2017). Sanches *et al.* (2019) encontraram boas correlações entre a estimativa do consumo de água pela sonda FDR e a evapotranspiração de referência (ET_o), e a evapotranspiração da cultura determinada por lisimetria (ET_{clis}), em solo cultivado com capim Mombaça e Cynodon.

Previamente à utilização da sonda capacitiva no presente estudo, foi realizada uma calibração para as condições do solo local, conforme processo descrito por Prudente Júnior *et al.* (2019). Como resultado, foram geradas equações para a estimativa do conteúdo de água no solo a partir da frequência relativa obtida pelo sensor para cada camada (Tabela 3).

Tabela 3. Equações de calibração da sonda capacitiva para obtenção do conteúdo de água no solo (Θ_v) a partir da frequência relativa (FR) por camada de solo.

Camada (m)	Θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	Θ_{pp} (cm ³ cm ⁻³)	Equação de Calibração	R ²
0,0 - 0,1	0,35	0,29	$\Theta_v = 0,4665 * FR^{1,4377}$	0,8605
0,1 - 0,2	0,35	0,30	$\Theta_v = 0,4542 * FR^{1,1693}$	0,9772
0,2 - 0,3	0,36	0,30	$\Theta_v = 0,4564 * FR^{0,9467}$	0,9895
0,3 - 0,4	0,34	0,29	$\Theta_v = 0,4718 * FR^{1,1062}$	0,8890
0,4 - 0,5	0,37	0,33	$\Theta_v = 0,5509 * FR^{1,1363}$	0,9585
0,5 - 0,6	0,41	0,36	$\Theta_v = 0,5794 * FR^{1,3256}$	0,9381
0,6 - 0,7	0,39	0,35	$\Theta_v = 0,6397 * FR^{2,1974}$	0,8838
0,7 - 0,8	0,38	0,32	$\Theta_v = 0,5597 * FR^{2,0009}$	0,9628

Θ_{cc} : umidade na capacidade de campo; Θ_{pp} : umidade no ponto de murcha; Θ_v : conteúdo de água no solo; FR: frequência relativa.

A instalação dos tubos de acesso para a sonda FDR foi realizada conforme instruções do fabricante durante o período de estabelecimento da cultura (figura 5) e, assim, definidos três pontos de medição por tratamento. Os tubos de acesso foram instalados considerando uma distância de 0,25 m do ponto de emissão de água (FRIZZONE *et al.*, 2012), com leituras a cada 0,10 m em oito profundidades (0,10 m; 0,20 m; 0,30 m; 0,40 m; 0,50 m; 0,60 m; 0,70 m e 0,80 m), sendo as leituras de conteúdo de água no solo nas profundidades de 0,20 m; 0,30 m e 0,40 m aquelas consideradas para o manejo da irrigação, em razão da profundidade efetiva do sistema radicular da

cultura. Dessa forma, o comportamento do conteúdo de água ao longo do perfil do solo foi monitorado durante todo o período de estudo.

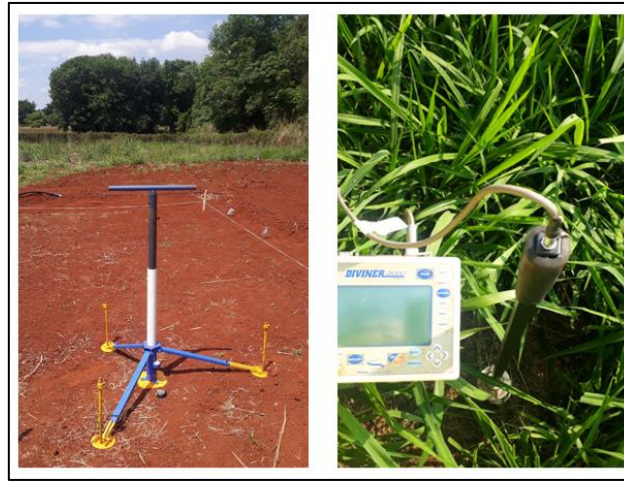


Figura 5. Instalação dos tubos de acesso e monitoramento do conteúdo de água no solo via sonda FDR.

Os eventos de irrigação foram realizados a fim de manter o conteúdo de água no solo entre a umidade crítica, $f = 0,6$ (Allen *et al.*, 1998), e a capacidade de campo, garantindo boas condições de disponibilidade hídrica no solo para o desenvolvimento da cultura. A partir das leituras realizadas nos três tubos de acesso por tratamento, chegou-se a um valor médio de umidade atual para cada camada. A estimativa do armazenamento de água no solo (L_{arm}) foi realizada por meio da integração dos valores médios de umidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) nas profundidades Z (mm) consideradas no manejo (equação 1).

$$L_{arm} = \int_{Z_0}^{Z_i} \theta_i * dz \quad \text{Equação 1}$$

A partir dos dados de conteúdo atual de umidade do solo (θ_a) por camada, a lâmina líquida de irrigação necessária (LI) foi estimada (equação 2) para posterior estimativa da lâmina bruta de irrigação (LB), considerando a eficiência de aplicação do sistema (ea). A partir da relação entre lâmina bruta de irrigação e lâmina aplicada por hora (Lh), o tempo de irrigação necessário (TI) foi calculado.

$$LI = (\theta_{cc} - \theta_a) * Z \quad \text{Equação 2}$$

$$Lh = \frac{q}{Se * SL} \quad \text{Equação 3}$$

$$TI = \frac{LB}{Lh} \quad \text{Equação 4}$$

Em que,

LI – Lâmina líquida de irrigação necessária, mm;

θ_a – Umidade atual do solo; $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

- θ_{cc} – Umidade de capacidade de campo, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;
 Z – Profundidade considerada para o manejo de irrigação, mm.
 Lh – Lâmina aplicada por hora, mm/h;
 q – Vazão por metro linear, L/h/m;
 Se – Espaçamento entre emissores, m;
 SL – Espaçamento entre linhas, m;
 TI – Tempo de irrigação, h;
 LB – Lâmina bruta de irrigação, mm.

3.6. Dados biométricos e produtivos do Mombaça

Com relação à cultura envolvida no estudo, medidas da altura do dossel foram registradas semanalmente ao longo de cada ciclo produtivo mediante o uso de um bastão graduado (figura 6). Por meio de caminhamento na área, em cada evento de leitura foram registradas 30 medidas em pontos aleatórios, a partir dessas leituras foi calculada a média de altura do dossel, considerando a data de realização das leituras.



Figura 6. Bastão graduado sendo utilizado para medidas de altura do dossel na área experimental cultivada com capim Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial, em Piracicaba – SP.

Para obtenção dos dados de produção de matéria verde, matéria seca, relação folha-colmo e material morto, foram considerados ao final de cada ciclo cinco pontos por tratamento, mediante avaliação visual da altura do pasto e da massa de forragem (PEDREIRA, 2022). Para tanto, foi utilizado um quadrado amostrador de $0,25 \text{ m}^2$ de área ($0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$), cortando a forragem contida na área delimitada pelo quadrado, considerando uma altura de resíduo de $0,35 \text{ m}$. A partir das amostras coletadas, foi quantificada, inicialmente, a massa fresca da parte aérea - MFPA ($\text{g MF} / 0,25 \text{ m}^2$). Posteriormente, dividindo a amostra inicial em duas subamostras e seguindo-se com as ações de pesagem, separação botânica e secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C , foram obtidos os dados referentes a massa seca da parte aérea - MSPA ($\text{g MS} / 0,25 \text{ m}^2$), massa fresca e seca de colmos (g), massa fresca e seca de folhas (g), relação folha-colmo e produtividade (kg MS ha^{-1}). Algumas dessas ações são ilustradas na figura 7.



Figura 7. Representação das ações de coleta de forragem, separação botânica, secagem em estufa e pesagem.

A taxa de expansão da forragem (TEF) foi calculada, ao final de cada ciclo, a partir das medidas de altura do dossel conforme equação 5 (DRUMOND & AGUIAR, 2005):

$$TEF = \frac{H-Hr}{n} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

TEF – Taxa de expansão da forragem (cm dia⁻¹);

H – Altura do dossel antes da coleta (cm);

Hr – Altura do resíduo, fixada (35 cm);

n – Número de dias de crescimento.

A obtenção da produtividade da água (PA) se deu pela relação entre a produtividade de massa seca da parte aérea da forrageira e a quantidade de água aplicada, considerando as entradas via precipitação e irrigação, conforme equação 6 (FRIZZONE *et al.*, 2012).

$$PA = \frac{PC}{L} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

PA – Produtividade da água (kg m⁻³);

PC – Produtividade total de forragem em matéria seca (kg ha⁻¹);

L – Quantidade de água aplicada via irrigação e precipitação (m³ ha⁻¹).

Os dados medidos e estimados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos ($p < 0,05$), foi realizada a comparação das respectivas médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Relações entre as variáveis estudadas também foram realizadas por análise de regressão.

Referências

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998.

- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., de MORAES GONÇALVES, J.L., & SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. 2013.
- ARAÚJO, L. C.; SANTOS, P. M.; RODRIGUEZ, D.; PEZZOPANE, J. R. M. Key factors that influence for seasonal production of Guinea grass. *Scientia Agricola*, v.75, n.3, p.191-196, May/June 2018.
- BARROS, A. C.; FOLEGATTI, M. V.; SOUZA, C. F.; SANTORO, B. L. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e subsuperficial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, v.13, n.6, p.700-707, 2009.
- DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; FARIA, R. T.; MAZZONETTO, F.; CORBANI, R. Z. Uso da trifluralina no controle de intrusão radicular em gotejadores enterrados sob a cultura da cana-de-açúcar. *Irriga, Botucatu*, v. 20, n. 1, p. 82-91, janeiro-março, 2015.
- DIAS, H. B.; ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C. Um século de dados meteorológicos em Piracicaba, SP: Mudanças do clima pela classificação de Köppen. In: XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2017, Juazeiro/Petrolina. *Anais XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, 2017.
- DRUMOND, L. C. D.; AGUIAR, A. P. A. Irrigação de pastagem. Uberaba, 2005.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. Brasília: Embrapa, 2006.
- EMBRAPA. Cultivo da Videira. Semiárido: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2010.
- FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. Maringá: Eudem, 2012.
- GONÇALVES, I.Z.; BARBOSA, E. A. A.; SANTOS, L. N. S.; NAZÁRIO, A. A.; FEITOSA, D. R. C.; TUTA, N. F.; MATSURA, E. E. Water relations and productivity of sugarcane irrigated with domestic wastewater by subsurface drip. *Agricultural Water Management*, 185, 2017.
- MOCHÉ FILHO, W. J. E.; CARNEIRO, M. S. S.; ANDRADE, A. C.; PEREIRA, E. S.; ANDRADE, A. P.; CNDIDO, M. J. D. S.; MAGALHÃES, J. A.; RODRIGUES, B. H. N.; SANTOS, F. J. S.; COSTA, N. L. Produtividade e composição bromatológica de *Panicum maximum* cv. Mombaça sob irrigação e adubação azotada. *Revista de Ciências Agrárias*, 39 (1), 81 – 88, 2016.
- PEDREIRA, C. G. S.; PEDREIRA, B. C.; BITTAR, C. M. M.; FAUSTINO, M. G.; SANTOS, V. P.; FERREIRA, L. S.; LARA, M. A. S. Produtividade e degradabilidade ruminal da forragem de capins da espécie *Panicum maximum*. *Nativa, Sinop*, v. 02, n. 03, p. 143-148, jul./set. 2014. ISSN: 2318 – 7670
- PEDREIRA, C. G. Avanços metodológicos na avaliação de pastagens. Reunião anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 39, 100 – 150, 2022.
- PRUDENTE JUNIOR, A. C. Utilização de sonda capacitiva FDR para estimativa do consumo de água e coeficiente da cultura de *Urochloa brizantha* cv Marandu em cultivo solteiro e consorciado. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2019.
- PRUDENTE JUNIOR, A. C.; MENDONÇA, F. C.; SOUZA, D. P.; BRETAS, L. M.; AMORIM, D. M. Calibration of FDR probe in eutroferic red nitisol. In: V Inovagri Meeting. Fortaleza: [s.n.], 2019.
- SANCHES, A. C.; SOUZA, D. P.; JESUS, F. L. R.; MENDONÇA, F. C.; GOMES, E. P.; PEZZOPANE, J. R. M. Comparison of water consumption estimates for tropical and winter forages by FDR probes and weighing lysimeters. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 40, n. 3, 2019.

SANTOS, L. N. S.; MATSURA, E. E.; GONÇALVES, I. Z.; BARBOSA, E. A. A.; NAZÁRIO, A. A.; TUTA, N. F.; ELAIUY, M. C. L.; FEITOSA, D. R. C.; SOUSA, A. C. M. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agricultural Water Management* 170, 2016.

4. ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO PERFIL DO SOLO SOB IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL EM CAPIM MOMBAÇA: EFEITOS DE DIFERENTES ESPAÇAMENTOS ENTRE LINHAS LATERAIS DE IRRIGAÇÃO

Resumo

A irrigação por gotejamento subsuperficial tem apresentado um crescimento de uso na agricultura irrigada em diversos países, sendo considerada uma tecnologia de irrigação de alta eficiência. No contexto mais específico de uso desse sistema em pastagens irrigadas, são necessários estudos que avaliem a dinâmica da água no solo e seu efeito sobre a produtividade utilizando-se diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores. Esse estudo objetivou avaliar o armazenamento de água no perfil do solo e seu efeito sobre a produtividade do capim Mombaça submetido à irrigação por gotejamento subsuperficial com diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores. A pesquisa foi desenvolvida em uma área experimental da ESALQ/USP, localizada em Piracicaba – SP, Brasil. O delineamento experimental foi em blocos casualizados considerando quatro espaçamentos entre tubos gotejadores (S1 = 2,0 m; S2 = 1,5 m; S3 = 1,2 m; S4 = 1,0 m) e sete ciclos produtivos (C1, C2, C3, C4, C5, C6 e C7). O manejo da irrigação foi realizado via solo, com monitoramento do conteúdo de água no solo realizado via sonda capacitiva FDR – Frequency Domain Reflectometry. Foram analisadas a distribuição de água no perfil do solo para cada espaçamento do tubo gotejador e seu efeito sobre a altura do dossel (AD), produtividade de matéria verde (MV), produtividade de matéria seca (MS), índice de área foliar (IAF), taxa de expansão da forragem (TEF) e produtividade de água (PA). Para os ciclos do período primavera/verão, houve efeito de espaçamento entre tubos gotejadores para AD, TEF, sendo os maiores valores observados nos menores espaçamentos. Não houve efeito de espaçamento entre tubos gotejadores para MS nos ciclos C3, C5, C6 e C7. O maior valor médio encontrado para déficit foi de $0,063 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na profundidade de 0,70 m em S4. O maior valor médio obtido para excesso de água no solo foi de $0,033 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na profundidade de 0,30 m em S1. A pastagem responde bem à irrigação por gotejamento subsuperficial, sendo possível obter boas produtividades em espaçamentos entre tubos gotejadores superiores a 1,0 m.

Palavras-chave: SDI; irrigação de pastagens; forrageira; linha lateral; irrigação de precisão.

Abstract

Subsurface drip irrigation has shown a growing use in irrigated agriculture in several countries, being considered a high-efficiency irrigation technology. In the more specific context of the use of this system in irrigated pastures, studies are needed to assess the dynamics of water in the soil and its effect on productivity with different spacing between drip lines. This study aimed to evaluate the water content in the soil profile and its effect on the productivity of Mombaça grass under subsurface drip irrigation with different spacing between drip lines. The research was carried out in an experimental area of ESALQ/USP, Piracicaba – SP, Brazil. The experimental design was in randomized blocks considering four spacings between drip lines (S1 = 2.0 m; S2 = 1.5 m; S3 = 1.2 m; S4 = 1.0 m) and seven production cycles (C1, C2, C3, C4, C5, C6, and C7). Irrigation management was made via the soil, with monitoring of the water content in the soil using a capacitive probe FDR – Frequency Domain Reflectometry. Water distribution in the soil profile was analyzed for each drip line spacing and its effect on canopy height (CH), green matter productivity (GP), dry matter productivity (DM), leaf area index (LAI), forage expansion rate (LER), and water productivity (WP). For the crop cycles of the spring/summer period, there was an effect of spacing between drip lines for CH, and LER, with the highest values being observed in the smallest spacings. There was no effect of spacing between drip lines for DM in cycles C3, C5, C6, and C7. The highest average value found for the deficit was $0.063 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ at a depth of 0.70 m in S4. The highest average value obtained for excess water in the soil was $0.033 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ at a depth of 0.30 m in S1. The pasture has good responses

to subsurface drip irrigation, and it is possible to obtain good yields with spacing between drip lines greater than 1.0 m.

Keywords: SDI; pasture irrigation; pasture; drip line; precision irrigation.

4.1. Introdução

Globalmente, as pastagens cobrem mais áreas do que qualquer outra vegetação e constituem a principal fonte alimentar para animais criados a pasto (MICHALK et al., 2019). A produção média alcançada nas pastagens ainda não é próxima do potencial, no entanto, maiores rendimentos por hectare podem ser alcançados mediante melhores práticas de manejo e intensificação da produção. Estimativas da FAO apontam para uma população mundial de, aproximadamente, 9 a 10 bilhões de pessoas em 2050 (FAO, 2022). Consequentemente, haverá uma crescente na demanda por alimentos nos próximos anos, o que, por sua vez, incide na necessidade de aumento da produção agrícola.

Para atender a essa necessidade e garantir a segurança alimentar, é fundamental o investimento em tecnologias que proporcionem a elevação da eficiência produtiva. No manejo de pastagens, uma das tecnologias utilizadas na intensificação da produção é a irrigação. Estudos realizados por Mochel Filho et al. (2016), Souza et al. (2016), Sanches et al. (2017) e Melo et al. (2020) apontam para bons resultados produtivos obtidos com a irrigação de pastagens. Pastagens tropicais fertirrigadas podem chegar a permitir uma taxa de lotação animal de 8 a 12 UA ha⁻¹, com produtividade anual de até 60 toneladas de matéria seca por hectare, t MS ha⁻¹ (DRUMOND et al., 2021).

Em pastagens, os sistemas de irrigação mais comumente utilizados são os de aspersão. Entretanto, a adoção dos sistemas de irrigação localizada no cultivo de pastagens tem aumentado, sobretudo, em razão dos benefícios que a técnica da microirrigação oferece. Por outro lado, registros na literatura referentes à irrigação localizada em pastagens, especificamente por gotejamento subsuperficial (SDI), ainda são exíguos. Na irrigação por gotejamento subsuperficial (SDI), tubos gotejadores regularmente espaçados são instalados abaixo da superfície do solo, dentro da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura. Dessa forma, água e fertilizantes (fertirrigação) são aplicados diretamente na zona radicular. Essa configuração do sistema promove maior eficiência ao eliminar as perdas por evaporação e reduzir as perdas por percolação e lixiviação, reduzindo ou eliminando o risco de contaminação do lençol freático e o desenvolvimento de plantas daninhas na superfície do solo, além de facilitar o trânsito de máquinas e implementos na área irrigada (FU et al., 2021; SANDHU e IRMAK, 2022; WANG et al., 2022).

Nos últimos anos, a irrigação por gotejamento subsuperficial tem apresentado uso crescente na produção agrícola, sendo considerada uma tecnologia de irrigação de alta eficiência (KARIMI e APPELS, 2021; WANG et al., 2022). Apesar dos altos valores de eficiência e uniformidade de aplicação que podem ser alcançados no SDI, as propriedades hidráulicas do solo podem interferir na distribuição da umidade ao longo da zona radicular da cultura (SKAGGS et al., 2010). Dessa forma, os efeitos do uso do SDI no rendimento da cultura e na produtividade da água, dependem do manejo adotado, das condições climáticas locais e das propriedades do solo (WANG et al., 2022). Estudos demonstram que, se o sistema for bem projetado, instalado, operado e mantido adequadamente, a irrigação por gotejamento subsuperficial resulta em culturas de alto rendimento, reduções substanciais no volume de água utilizado na irrigação e forte redução da evaporação do solo na camada superficial (SANDHU e IRMAK, 2022).

O SDI é uma tecnologia com presença maciça na irrigação de frutas e hortaliças de alto valor agregado em regiões áridas (APPLES e KARIMI, 2021). Para além dessas culturas, estudos sobre o uso do SDI têm sido realizados para os cultivos de milho (MO et al., 2017), trigo (GAO et al., 2014), algodão (BORDOVSKY e MUSTIAN, 2020), cana-de-açúcar (SOUZA e BIZARI, 2018; DALRI et al. 2021), pastagem (MELO et al., 2020), soja, tomate e batata, além de outras culturas (LAMM et al., 2021; WANG et al., 2022). Entretanto, apesar das vantagens da utilização do SDI, a maior parte dos estudos avalia o sistema considerando sua produtividade final (MELO et al., 2020; DALRI et al. 2021; WANG et al., 2022), com utilização de água com diferentes qualidades e profundidades de instalação do tubo gotejador (SANTOS et al. 2016). É necessário avaliar o SDI para espécies de pastagens considerando além da produtividade obtida, podendo ser explorado a distribuição da água no perfil do solo para diferentes espaçamentos entre os tubos gotejadores. Uma das lacunas de conhecimento existente está relacionada ao espaçamento entre tubos gotejadores – linhas laterais – para sistemas de produção intensiva em pastagens semeadas a lanço, buscando definir aquele que resulta na maior efetividade da lâmina aplicada, de modo a aumentar a eficiência do uso da água (MELO et al., 2020). Dado que o Brasil é o segundo maior produtor de carne bovina do mundo e o maior exportador dessa commodity (FAO, 2022), é evidente o seu protagonismo na luta contra a insegurança alimentar mundial, bem como o desafio de buscar modelos de produção mais sustentáveis, com ênfase no uso racional da água e preservação dos recursos naturais.

Dado o contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o armazenamento da água no solo cultivado com capim mombaça (*Megathysus maximus* cv. Mombaça) irrigado por SDI com diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores, ao longo de sete ciclos produtivos, de crescimento e corte, e avaliar seu efeito sobre a produtividade da cultura. Ressalta-se que o capim mombaça é uma das espécies forrageiras mais comuns nos sistemas intensivos de produção animal baseados em pastagens no Brasil. Assim, buscou-se gerar informações técnicas para subsidiar a tomada de decisão nos sistemas produtivos que envolvem o cultivo dessa forrageira sob irrigação por gotejamento subsuperficial, bem como definir o espaçamento entre os tubos gotejadores que proporcionou o alcance de melhores respostas produtivas para o Mombaça.

4.2. Material e Métodos

O experimento de campo foi conduzido em uma área experimental da ESALQ/USP, localizada em Piracicaba - SP, nas coordenadas 22° 42' 14,6" S e 47° 37' 21,2" O, com altitude média de 569 m acima do nível do mar. De acordo com a classificação de Köppen (Peel *et al.*, 2007), o clima da região consiste no Cwa, subtropical úmido com inverno seco e verão quente.

O estudo foi realizado entre os meses de janeiro e outubro de 2020, abrangendo sete ciclos produtivos do capim Mombaça. Ao longo desse período de estudo, os dados das variáveis meteorológicas – temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e chuva, foram monitorados e obtidos na estação meteorológica automática da Esalq/USP, situada a 50 m da área experimental. O solo da área experimental foi classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico (SANTOS *et al.*, 2018). Os valores de capacidade de campo, ponto de murcha permanente, ponto de saturação e densidade volumétrica foram obtidos pela curva de retenção de água no solo, conforme descrito por Prudente Júnior (2019). As Tabelas 1 e 2 contêm, respectivamente, os dados referentes à caracterização química e física do solo.

Tabela 1. Características químicas do solo da área experimental.

Cam*	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S	CTC	V%	m%	S
	CaCl ₂		(resina)										SO ₄
Cm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³				V%	m%	mg dm ⁻³
0-20	6,4	34	73,5	5,2	44,5	26,0	14,5	0	76	90,5	83,5	0	3,5
20-40	5,7	23	17,5	2,3	28,0	17,0	21,5	0	47,5	69,0	69,0	0	25,5
	Cu		Fe			Zn		Mn		B			(água quente)
					DTPA								
					mg/dm ³								
0-20	4,1		11,4			2,9		32					0,3
20-40	4		14,6			1,4		26,8					0,2

* Cam: camada; pH CaCl₂: potencial hidrogeniônico determinado em CaCl₂; MO: matéria orgânica; P (resina): fósforo disponível extraído pelo método da Resina de Troca Iônica; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; H+Al: acidez potencial; Al: alumínio trocável; S: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação de bases; m%: saturação de alumínio; S SO₄: enxofre (sulfato); Cu: cobre; Fe: ferro; Zn: zinco; Mn: manganês; B: boro.

Tabela 2. Características físicas do solo da área experimental.

Camada	PT	Ds	Argila	Silte	Areia
(m)	(cm ³ cm ⁻³)	(g cm ⁻³)	(%)	(%)	(%)
0-0,1	0,50	1,39	46,20	20,43	33,38
0,1-0,2	0,48	1,55	51,07	18,72	30,21
0,2-0,3	0,45	1,62	54,75	15,48	29,77
0,3-0,4	0,45	1,60	58,79	15,68	25,53
0,4-0,5	0,48	1,49	60,88	13,53	25,59
0,5-0,6	0,50	1,48	61,13	13,19	25,69
0,6-0,7	0,53	1,25	60,42	10,75	28,83
Média	0,48	1,48	56,18	15,40	28,43
Desvio Médio	0,02	0,09	4,72	2,49	2,42
C.V. (%)	4,55	6,33	8,40	16,18	8,52

PT: porosidade total; Ds: densidade do solo.

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento subsuperficial, com emissores autocompensantes e dispositivos anti-sifão, espaçados a 0,50 m, com pressão máxima de trabalho de 18 mca, vazão nominal de 1,0 L h⁻¹ e coeficiente de variação de vazão dos emissores, CV_q (F), de 3%. As linhas laterais de gotejo foram instaladas na profundidade de 0,20 m, na região de maior concentração da zona radicular efetiva da cultura (CUNHA *et al.*, 2010).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, considerando quatro espaçamentos entre tubos gotejadores (S1 = 2,0 m; S2 = 1,5 m; S3 = 1,2 m; S4 = 1,0 m) e sete ciclos produtivos (C1, C2, C3, C4, C5, C6 e C7). Ao final de cada ciclo produtivo do Mombaça, a pastagem era rebaixada com roçadeira elétrica, mantendo-se uma altura de resíduo de 0,35 m após os cortes (PEDREIRA *et al.*, 2014), de modo a garantir a presença de adequada quantidade de biomassa remanescente pós-colheita.

Aduações de estabelecimento e cobertura foram realizadas com o equivalente a 50 e 80 kg ha⁻¹ de N nos períodos de outono/inverno e primavera/verão, respectivamente, a cada início de um novo ciclo produtivo da cultura. Os intervalos de colheita foram baseados na determinação de ciclos de 28 dias para o período de primavera/verão e de 42 dias para o período de outono/inverno, totalizando sete ciclos produtivos, com a última colheita realizada em 21/10/2020 (tabela 3).

Tabela 3. Ciclos produtivos do Mombaça, com datas de início e fim, realizados durante o período experimental.

Ciclos	Período	Estação
1	22/01 a 18/02	Verão
2	19/02 a 18/03	Verão
3	19/03 a 15/04	Outono
4	14/05 a 23/06	Outono
5	24/06 a 01/08	Inverno
6	14/08/ a 24/09	Inverno
7	25/09 a 21/10	Primavera

O manejo da irrigação foi realizado via balanço hídrico do solo, com monitoramento do conteúdo de água no solo feito a cada dois dias, momentos antes da irrigação. Para esse monitoramento, foi utilizada uma sonda capacitiva FDR – *Frequency Domain Reflectometry*, com estimativa da umidade no perfil do solo a cada 0,10 m até a profundidade de 0,80 m. Previamente à utilização da sonda capacitiva no presente estudo, foi realizada uma calibração para as condições do solo local, conforme processo descrito por Prudente Júnior *et al.* (2019). Como resultado, foram geradas equações para a estimativa do conteúdo de água no solo a partir da frequência relativa obtida pelo sensor para cada camada (Tabela 4).

Tabela 4. Equações de calibração da sonda capacitiva para obtenção do conteúdo de água no solo (Θ_v) a partir da frequência relativa (FR) por camada de solo.

Camada (m)	Θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	Θ_{pp} (cm ³ cm ⁻³)	Equação de Calibração	R ²
0,0 - 0,1	0,35	0,29	$\Theta_v = 0,4665 * FR^{1,4377}$	0,8605
0,1 - 0,2	0,35	0,30	$\Theta_v = 0,4542 * FR^{1,1693}$	0,9772
0,2 - 0,3	0,36	0,30	$\Theta_v = 0,4564 * FR^{0,9467}$	0,9895
0,3 - 0,4	0,34	0,29	$\Theta_v = 0,4718 * FR^{1,1062}$	0,8890
0,4 - 0,5	0,37	0,33	$\Theta_v = 0,5509 * FR^{1,1363}$	0,9585
0,5 - 0,6	0,41	0,36	$\Theta_v = 0,5794 * FR^{1,3256}$	0,9381
0,6 - 0,7	0,39	0,35	$\Theta_v = 0,6397 * FR^{2,1974}$	0,8838
0,7 - 0,8	0,38	0,32	$\Theta_v = 0,5597 * FR^{2,0009}$	0,9628

Θ_{cc} : umidade na capacidade de campo; Θ_{pp} : umidade no ponto de murcha; Θ_v : conteúdo de água no solo; FR: frequência relativa.

A instalação dos tubos de acesso para a sonda FDR foi realizada conforme instruções do fabricante durante o período de estabelecimento da cultura e, assim, definidos três pontos de medição por tratamento. Os tubos de acesso foram instalados considerando uma distância de 0,25 m do emissor (FRIZZONE *et al.*, 2012). As leituras foram feitas em oito profundidades (0,10 m; 0,20 m; 0,30 m; 0,40 m; 0,50 m; 0,60 m; 0,70 m e 0,80 m), e as leituras de conteúdo de água no solo na camada do ponto de emissão até a profundidade de 0,40 m foram aquelas consideradas para o manejo da irrigação, em razão da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (ALENCAR *et al.*, 2010). Dessa forma, o comportamento do conteúdo de água ao longo do perfil do solo foi monitorado durante todo o período de estudo.

A irrigação foi realizada de modo manter a umidade do solo entre a capacidade de campo (θ_{cc}) e a umidade crítica (θ_{crit}), que foi determinada estipulando um fator de depleção $f = 0,6$, garantindo a disponibilidade hídrica no solo para o desenvolvimento da cultura sem déficit hídrico. A estimativa do armazenamento de água no solo L_{arm} foi realizada por meio da integração dos valores de umidade (θ_i) nas profundidades (dz) de 0,10 a 0,20m,

0,20 a 0,30m e 0,30 a 0,40 m (equação 1), considerando a profundidade de instalação dos tubos gotejadores bem como a profundidade efetiva da zona radicular da cultura.

$$L_{arm} = \int_{Z_0}^{Z_i} \theta_i * dz \quad \text{Equação 1}$$

A partir dos dados de conteúdo atual de umidade do solo (θ_a) por camada, a lâmina líquida de irrigação necessária (LI) foi estimada (equação 2) para posterior estimativa da lâmina bruta de irrigação (LB), considerando a eficiência de aplicação do sistema (ea). A partir da relação entre lâmina bruta de irrigação e lâmina aplicada por hora (Lh), o tempo de irrigação necessário (TI) foi calculado (equação 4).

$$LI = (\theta_{cc} - \theta_a) * Z \quad \text{Equação 2}$$

$$Lh = \frac{q}{Se * SL} \quad \text{Equação 3}$$

$$TI = \frac{LB}{Lh} \quad \text{Equação 4}$$

Em que,

LI – Lâmina líquida de irrigação necessária, mm;

θ_a – Umidade atual do solo; $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_{cc} – Umidade de capacidade de campo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

Z – Profundidade considerada para o manejo de irrigação, mm.

Lh – Lâmina aplicada por hora, mm/h;

q – Vazão por metro linear, L/h/m;

Se – Espaçamento entre emissores, m;

SL – Espaçamento entre linhas, m;

TI – Tempo de irrigação, h;

LB – Lâmina bruta de irrigação, mm.

Medidas da altura do dossel foram registradas semanalmente ao longo de cada ciclo produtivo mediante o uso de um bastão graduado. As leituras foram realizadas considerando a altura tomada a partir do solo até a extremidade mais alta de uma folha expandida, considerando as folhas ao redor do bastão. Por meio de caminhamento na área, em cada evento de leitura foram registradas 30 medidas em pontos aleatórios, a partir dessas leituras foi calculada a média de altura do dossel, considerando a data de realização das leituras.

Para obtenção dos dados produtivos, ao final de cada ciclo foram coletadas aleatoriamente cinco amostras de forragem por tratamento na área útil das parcelas. Para tanto, foi utilizado um quadrado amostrador de 0,25 m² de área (0,5 m x 0,5 m), cortando a forragem contida na área delimitada pelo quadrado, considerando uma altura de resíduo de 0,35 m. A partir das amostras coletadas, foi quantificada, inicialmente, a massa fresca da parte aérea - MFPA (g MF / 0,25 m²). Posteriormente, foram feitas subamostras e prosseguiu-se com a separação botânica em folha, colmo e material morto, e a pesagem em balança eletrônica. As subamostras foram submetidas a secagem em

estufa com circulação forçada de ar, a 65°C, até atingir peso constante. Após a secagem, as subamostras foram pesadas visando a quantificação da produtividade de matéria seca (kg MS ha⁻¹).

Os dados medidos e estimados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos ($p < 0,05$), foi realizada a comparação das respectivas médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Relações entre as variáveis estudadas também foram realizadas por análise de regressão.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Variáveis meteorológicas

As médias diárias das principais variáveis meteorológicas obtidas durante o período de estudo são apresentadas na Figura 1. Os dados da evapotranspiração de referência (ET_o) foram estimados pelo método Penman-Monteith – FAO (ALLEN et al., 1998).

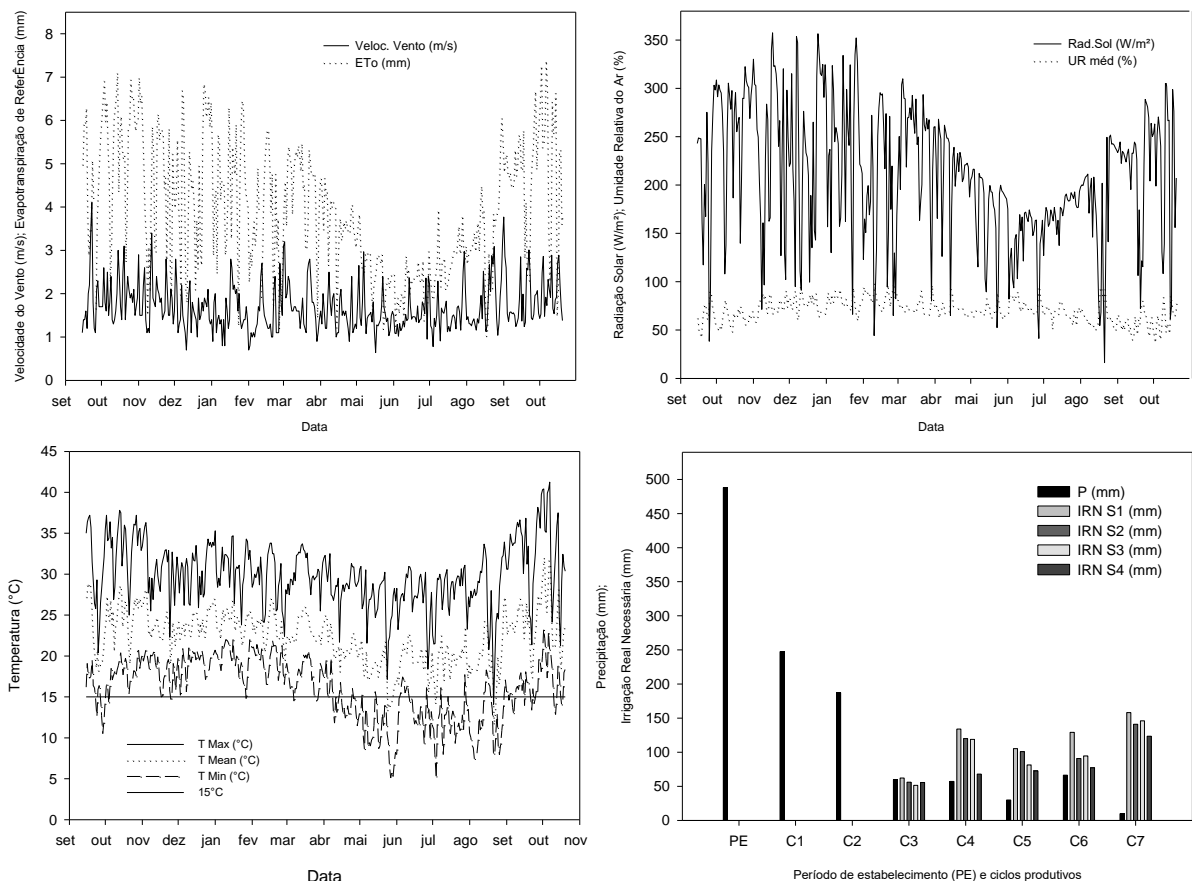


Figura 1. Médias diárias das variáveis meteorológicas durante o período de estudo, setembro/2019 a outubro/2020, e a necessidade de irrigação estimada por ciclo para cada tratamento.

De acordo com os registros meteorológicos de setembro/2019 a outubro/2020, período que contempla os dias entre a semeadura e a colheita do último ciclo, respectivamente, a temperatura média foi de 22,4°C, com médias máxima e mínima de, respectivamente, 29,9°C e 16°C. Forrageiras tropicais têm resposta à irrigação diretamente proporcional a altas temperaturas e ausência de chuvas (DRUMOND *et al.*, 2021).

Temperaturas abaixo dos 15°C foram registradas, sobretudo, nos períodos de outono e inverno, entre os meses de maio a agosto, chegando ao menor valor em 04 de julho de 2020, esse correspondendo a 5° C. Os efeitos de temperaturas entre 10 e 15 °C sobre os processos fisiológicos de gramíneas tropicais é ínfimo ou inexistente, o que leva muitos a, geralmente, considerarem 15°C como a temperatura base para o crescimento dessas forrageiras (MORENO *et al.*, 2014). Baixas temperaturas estão associadas a menores taxas de radiação, o que limita a produtividade das culturas forrageiras ao comprometer seu desenvolvimento estrutural e composição nutricional (Alves *et al.*, 2021).

Conduzindo um estudo com capim Mombaça irrigado em Piracicaba – SP, Jesus *et al.* (2021) registraram maior acúmulo material morto no inverno, estação na qual a temperatura mínima chegou aos 3,1° C, do que nas outras estações. Os autores atribuíram esse resultado à diminuição do ritmo dos processos metabólicos associados ao crescimento vegetal, que é nulo ou mínimo em temperaturas abaixo da basal. De acordo com Pereira *et al.* (2011), o Mombaça tem seu desenvolvimento paralisado durante o inverno.

Considerando que o crescimento e produção de pastagens tropicais têm como principais propulsores o clima, o solo e o manejo, em regiões com temperaturas mais rigorosas no inverno, produções satisfatórias não são alcançadas nesse período, mesmo recorrendo à irrigação, em razão da temperatura do ar atuar como o principal fator limitante na produção de pastagens tropicais (Araújo *et al.*, 2018). De acordo com Reis *et al.* (2017), nos períodos de estacionalidade de produção, nos quais há uma redução na oferta de forragem em razão da associação de baixas temperaturas, curtos fotoperíodos e déficit hídrico, a irrigação contribui, em certa medida, para a produção obtida, ainda que o total alcançado não seja próximo do potencial. Para que uma cultura alcance seu potencial produtivo é necessário que haja, conjuntamente, condições ótimas de clima, adubação, umidade do solo, entre outros fatores, não havendo qualquer fator limitante ao seu desenvolvimento (ALENCAR *et al.*, 2009).

A precipitação total no período de estudo foi de 1318,8 mm, sendo 945 mm concentrados no período de novembro de 2019 a fevereiro de 2020, que consiste no período de estabelecimento da cultura e de condução dos ciclos produtivos 1 e 2. Em razão dos altos índices pluviométricos registrados nesse período, não houve eventos de irrigação. A partir do ciclo 3, a necessidade de irrigação foi estimada com base no conteúdo de água no solo monitorado via sonda FDR, chegando a um valor máximo de 158 mm no sétimo ciclo produtivo.

4.3.2. Estimativa do conteúdo de água no solo via sonda FDR

O conteúdo médio geral de água no solo para cada tratamento nas profundidades de 0,10 m a 0,80 m, obtido via sonda FDR, é apresentado na Figura 2 com indicações por profundidade das ocorrências de excesso e déficit, quando houve. Complementando essa informação, na mesma figura também é apresentada a umidade média obtida por camada em cada ciclo produtivo.

Baseado nos limites de capacidade de campo e ponto de murcha, houve pequenos indicativos de déficit e excesso em algumas camadas do solo, dependendo do tratamento. Geralmente, as gramíneas forrageiras tropicais são tolerantes ao déficit hídrico (Araújo *et al.*, 2018). O maior valor médio obtido para déficit foi de 0,063 cm³ cm⁻³ na

profundidade de 0,70 m no espaçamento entre tubos gotejadores de 1,0 m (S4). O maior valor médio obtido para excesso de água no solo foi de $0,032 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na profundidade de 0,30 m, no espaçamento entre tubos gotejadores de 2,0 m (S1). A distribuição espacial da água ao redor dos emissores de SDI é determinada pelas propriedades hidráulicas do solo e características de absorção de água pelas raízes (APPLES e KARIMI, 2021). No presente estudo, as profundidades de 0,10 a 0,50 m foram aquelas mais próximas à saída de água, localizada a 0,20 m da superfície do solo, e que compõem a zona radicular da cultura. A condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) para essas primeiras camadas fica entre $0,96$ e $1,30 \text{ cm h}^{-1}$, conforme determinado por Prudente Júnior (2019) em estudo prévio no solo em questão e os valores mais altos correspondem às camadas menos profundas. Tais fatores associados aos tratamentos utilizados e à profundidade de instalação dos tubos gotejadores resultaram nos valores para o conteúdo de água no solo apresentados na Figura 2. Gonçalves *et al.* (2017) identificaram maior teor de umidade nas camadas de 0,20 m a 0,60 m para tubos gotejadores instalados a 0,20 m de profundidade. Apples e Karimi (2021) verificaram em um cultivo de alfafa irrigado por SDI que a maior taxa de absorção de água pelas raízes ocorreu em uma camada abaixo dos emissores, onde a umidade do solo foi mais dinâmica.

A camada de 0 a 0,10 m é a que possui maior teor de areia com relação às demais, 33,38% (Tabela 2). Como estava acima das linhas de gotejamento subsuperficial, em condições de ausência de chuvas o seu teor de umidade dependia apenas do processo de ascensão capilar. Por essa razão, essa camada apresentou umidade de solo tanto em condições adequadas como, também, em condições de nível de estresse de até $0,021 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, não havendo identificação de excedente hídrico. Durante o ciclo 1, a entrada de água no solo deu-se apenas por precipitação pluvial, totalizando 235 mm. Nesse ciclo, o teor mínimo de umidade média do solo na camada de 0 a 0,10 m foi de $0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, em S3 (1,2 m), umidade acima do ponto de murcha permanente, assim como nos demais tratamentos (Figura 2).

A camada de 0 a 0,10 m foi uma daquelas em que foram observadas as maiores variações da umidade do solo (Figura 3). Tal resultado corrobora o que foi obtido por Melo *et al.* (2020), que observaram uma maior variação no conteúdo de água na camada de 0 a 0,10 m de um solo cultivado com capim Marandu irrigado por gotejamento subsuperficial. No estudo de Gonçalves *et al.* (2017) com cana irrigada por gotejamento subsuperficial, os menores valores de umidade foram observados na camada de 0 a 0,20 m, com tubos gotejadores instalados nas profundidades de 0,20 m e a 0,40 m. Os autores também observaram a ocorrência de déficit hídrico na camada de 0 a 0,20 m para a profundidade de instalação de 0,40 m. No presente trabalho, foram identificados excedentes hídricos de até $0,033 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ nos espaçamentos S1 (2,0 m) e S4 (1,0 m), nas camadas de 0,20 m a 0,30 m e de 0,30 m a 0,40 m. Essas faixas de profundidade contemplam o ponto de saída de água, localizado a 0,20 m, bem como a camada imediatamente abaixo da camada dos emissores (0,30 m a 0,40 m).

O maior espaçamento entre os tubos gotejadores (S1 – 2,0 m), com menor quantidade de emissores por área, resultou em maiores valores de irrigação total necessária (ITN), enquanto em S4 (1,0 m) – menor espaçamento entre os tubos gotejadores e maior número de emissores por área – foram obtidos os menores valores de ITN. O maior tempo de irrigação necessário para atender ao ITN em S1 acarretou uma aplicação de água de forma constante por horas que, em razão da textura, condutividade hidráulica do solo e atividade das raízes nas camadas de 0,20 m a 0,30 m e de 0,30 m a 0,40 m, pode ter influenciado na distribuição de água no tempo e no espaço, o que consiste na formação e avanço da frente de umedecimento. Já em S4, um menor tempo de irrigação foi necessário para atender à ITN, no entanto, a maior proximidade entre os tubos gotejadores pode ter contribuído para os índices de umidade do solo obtidos. Santos *et al.* (2015) observaram que o aumento do tempo de irrigação em um solo argiloso resultou

em aumento na profundidade da frente de umedecimento. Assim, observa-se que o volume de água aplicado que não aumenta o diâmetro superficial e o diâmetro máximo do bulbo molhado, aumenta sua profundidade.

Ao analisarem a distribuição de água em um Nitossolo Vermelho aplicada por gotejamento subsuperficial, Barros *et al.* (2009) observaram que no início da irrigação o maior aumento da frente de umedecimento se dá na direção vertical e no sentido descendente, aumenta posteriormente na direção horizontal e, por fim, volta a crescer na direção vertical e no sentido descendente. Os autores afirmaram que, apesar de a área superficial molhada obtida no uso do SDI ser menor que no gotejamento superficial, esse sistema disponibilizou água a uma maior distância do emissor no solo em questão. Ao consultar novamente os dados apresentados na Figura 2, observa-se que as camadas mais profundas tiveram, de forma geral, valores adequados para a umidade do solo, com exceção da camada 0,70 m em S1 e S4, onde houve identificação de déficit hídrico de 0,05 e 0,06 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente. Ao longo dos ciclos produtivos, o conteúdo de água no solo nas camadas entre a profundidade de instalação dos tubos gotejadores e a profundidade de 0,60 m ficou acima da umidade de ponto de murcha permanente.

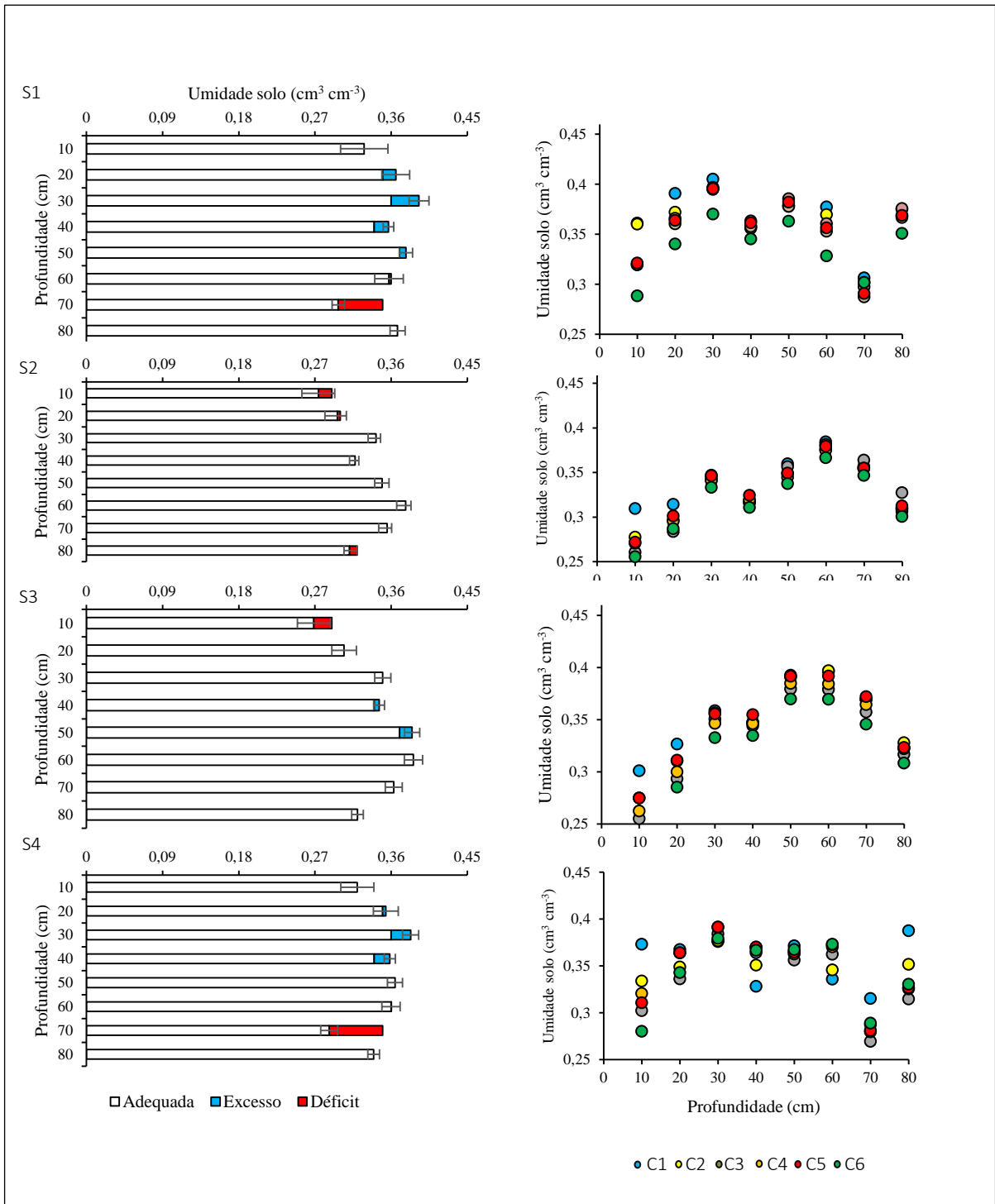


Figura 2. Conteúdo médio de umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em S1, S2, S3 e S4 durante os ciclos produtivos do capim. Mombaça em um Nitossolo, Piracicaba-SP.

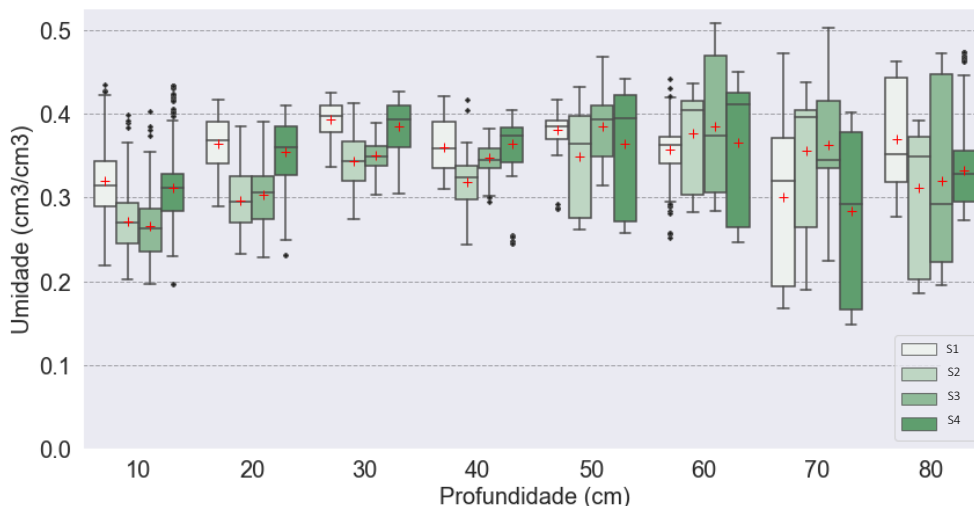


Figura 3. Boxplot da umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) por profundidade em um solo irrigado por gotejamento subsuperficial.

De modo geral, considerando cada profundidade analisada no perfil do solo, foram observadas variações com relação ao conteúdo de água no solo em todas elas. A amplitude identificada na profundidade de 0,70 m foi a mais expressiva, sendo a camada na qual foram observados o menor e o segundo maior valor de umidade do solo. As menores variações foram observadas nas camadas 0,20 – 0,30 m e 0,30 – 0,40 m, que são subsequentes à profundidade de localização dos emissores (0,20 m). O espaçamento S3 (1,2 m) destacou-se por apresentar a menor discrepância entre os dados. Pela Figura 3 também é possível constatar que os tratamentos S2 (1,5 m) e S4 (1,0 m) apresentaram distribuição de dados similar nas profundidades 0,50 m e 0,60 m. As maiores médias de umidade do solo nas profundidades de 0,20 a 0,40 m foram observadas no menor espaçamento entre os tubos gotejadores (S4, 1,0 m). Outliers foram observados de forma mais expressiva na camada mais próxima à superfície do solo (0,10 m), que na ausência de chuva tem sua umidade dependente apenas do processo de ascensão capilar, no gotejamento subsuperficial. Dessa forma, os maiores valores de umidade encontrados para essa camada podem ser atribuídos aos eventos de precipitação.

4.3.3. Respostas biométricas e produtivas da cultura

As respostas biométricas e produtivas do Mombaça foram obtidas ao longo de sete ciclos produtivos, considerando quatro espaçamentos entre os tubos gotejadores. O resultado do teste Tukey a 5% de probabilidade é apresentado na Tabela 5, onde é possível observar as variáveis em que houve ou não efeito de ciclo e/ou espaçamento.

Nos ciclos 1 e 2 foram observados os maiores registros de precipitação, não havendo eventos de irrigação. De forma geral, comparando-se as médias das variáveis MFPA, MS, IAF e PA entre os ciclos 1 e 2 em cada espaçamento, as maiores médias obtidas ocorreram no ciclo 2. Esse resultado pode ser atribuído aos altos registros de precipitação, 247,4 mm no ciclo 1 e 187,2 mm no ciclo 2, sendo que o total de chuva do ciclo 1 gerou o maior excesso de água no perfil do solo. De acordo com Oliveira *et al.*, (2022), o déficit ou o excedente hídrico estão entre as principais causas de estresse nos vegetais, podendo suprimir seu desenvolvimento aéreo e radicular.

Observou-se que a definição dos intervalos de colheita em ciclos de 28 dias para o período de primavera/verão e de 42 dias para o período de outono/inverno resultou em alturas de dossel (AD) maiores que 90 cm, sobretudo nos ciclos conduzidos no período primavera/verão, nos quais os fatores ambientais associados ao manejo da pastagem favorecem o alcance de bons índices biométricos e produtivos. Para o Mombaça, a AD de 90 cm corresponde a uma interceptação de 95% da luz incidente, circunstância em que ocorrem as melhores condições de estrutura da pastagem, sendo essa a altura adotada como referência de entrada dos animais para pastejo (CARVALHO *et al.*, 2017).

Nos ciclos C6 e C7 houve diferença estatística entre os espaçamentos utilizados com relação à AD, com menores valores registrados no espaçamento S1. Considerando que esse foi o espaçamento no qual havia mais áreas de solo exposto entre as touceiras, a competição por luminosidade foi menor, bem como o autossombreamento, possibilitando o aumento do número de perfilhos por touceira. De acordo com Pereira *et al.* (2011), o aumento da competição por luz induz o alongamento dos colmos para favorecer a captação de radiação fotossinteticamente ativa pelas folhas.

A AD é correlacionada à taxa de expansão da forragem (TEF), que também apresentou maiores valores nos ciclos do período primavera/verão, alcançando a taxa de 3,57 cm dia⁻¹ no espaçamento S2 em C7. Pereira *et al.* (2011) registraram uma taxa de 3,42 cm dia⁻¹ para o capim Mombaça com aplicação de nitrogênio na dose de 320 kg ha⁻¹ e densidade de 49 plantas m². A TEF correlaciona-se com o índice de área foliar (IAF). Quanto maior for a TEF, maior será a área foliar fotossinteticamente ativa e o acúmulo de forragem, havendo uma correlação positiva com o rendimento forrageiro (MARTUSCELLO *et al.*, 2015). No presente estudo, os ciclos do período primavera/verão apresentaram efeito significativo dos espaçamentos entre tubos gotejadores sobre as variáveis AD e TEF, com os maiores valores observados nos menores espaçamentos entre tubos gotejadores (Tabela 5).

O ciclo 5 foi conduzido no inverno e a produtividade de matéria seca nele equivaleu, aproximadamente, a 50% da obtida no ciclo 7, conduzido na primavera. Alencar *et al.* (2009) obtiveram maiores produtividades de matéria seca para capins do gênero *Panicum* (Syn. *Megathyrsus*) sob irrigação na estação primavera/verão em relação às obtidas na estação outono/inverno. Os autores atribuíram os menores resultados às baixas temperaturas e aos baixos índices de radiação observados no outono/inverno. No presente estudo, as temperaturas médias e mínima durante o ciclo 5 foram de 19,22° C e 4,9° C, respectivamente, e não houve efeito de espaçamento entre tubos gotejadores para as variáveis, exceto para a produtividade de água (PA), com diferença significativa e maior média registrada no menor espaçamento (S4). De acordo com Oliveira *et al.* (2023), na região Sudeste a oferta de forragem é menor no período que contempla os meses de abril a setembro, denominado período das secas, quando comparado ao período das águas, período entre outubro e março, em razão das condições climáticas que são menos favoráveis à produção vegetal, haja vista as quedas na temperatura, luminosidade e precipitação pluvial que ocorrem no período das secas.

O ciclo 7 foi conduzido na primavera, com boas condições de temperatura e luminosidade (Figura 2) e alta dependência da irrigação para o suprimento da demanda hídrica da cultura, tendo em vista a precipitação acumulada de apenas 9,7 mm. Nesse ciclo, as maiores médias para AD, TEF, MFPA e PA foram observadas em S2 e S4, sem diferença estatística entre eles ($p > 0,05$). Ainda nesse ciclo, não houve efeito de espaçamento entre tubos gotejadores sobre as variáveis IAF e MS.

A ausência de efeito do espaçamento entre tubos gotejadores sobre a massa seca da parte aérea (MSPA) foi um resultado obtido nos ciclos 3, 5, 6 e 7. Esse resultado aponta para a ausência de diferença estatística significativa entre os valores de MSPA obtidos no maior espaçamento (S1) e no menor espaçamento (S4) entre tubos gotejadores. Utilizar maiores espaçamentos entre tubos gotejadores reduz os custos de aquisição de um sistema de

irrigação por gotejamento subsuperficial. Quanto menor o espaçamento entre tubos gotejadores, maior o número de linhas laterais e maior o custo de aquisição e manutenção do sistema (SKAGGS *et al.* 2010).

Analisando a qualidade de forragem do capim Mombaça irrigado na região Oeste do estado de São Paulo, Vanzela *et al.* (2006) obtiveram maiores valores de taxa de acúmulo de matéria seca nos ciclos conduzidos entre outubro e dezembro, passando dos 120 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹. Mota *et al.* (2020) registraram maiores produções de matéria seca nos três ciclos conduzidos no inverno/primavera, 10705 kg ha⁻¹, em relação aos ciclos conduzidos no verão, 9954 kg ha⁻¹ e no outono, 8261 kg ha⁻¹. Ao avaliarem a variabilidade de produção de matéria seca do capim Mombaça ao longo de dois anos, Jesus *et al.* (2021) chegaram a resultados de produção no período primavera/verão (38556,5 kg MS ha⁻¹) mais elevados do que aqueles obtidos no outono/inverno (23050 kg MS ha⁻¹).

Tabela 5. Médias dos valores obtidos para as variáveis biométricas e produtivas do Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial com diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores (S1, S2, S3 e S4) em sete ciclos produtivos.

Variável*	Ciclo							Média
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
AD (cm)								
S1	125,4ABab	99,0Da	134,4Aa	109,5DEa	82,2Ea	101,2Db	117,9BCb	109,9
S2	133,0Aa	102,9BCa	141,2Aa	76,6Dc	88,8CDa	113,9Ba	131,5Aa	112,5
S3	118,6BCb	108,4Ca	137,0Aa	86,5Dab	91,0Da	116,9BCa	126,8ABab	112,1
S4	128,8ABab	99,4Ca	140,4Aa	97,7Cbc	92,6Ca	115,8Ba	131,3Aa	115,1
Média	126,4	102,4a	138,2a	92,5	88,6	111,9	126,8	
MFPA (kg ha ⁻¹)								
S1	21147,1BCa	29385,3ABa	32513,1Aa	24467,9ABCa	16364,5Ca	22586,0BCa	26838,8ABb	24757,5
S2	21078,2BCa	28206,5ABa	33954,4Aa	1134,6Cb	14483,6BCa	20426,0ABCa	32235,2Aa	21645,5
S3	9889,7Db	24598,0ABCa	28452,7ABa	1176,5Db	16553,6CDa	19066,0BCDa	35789,2Aab	19360,8
S4	21666,6BCa	24262,8BCa	30886,6ABa	20569,1Ca	17649,5Ca	22746,0BCa	37654,0Aa	25062
Média	18445,4	26613,1	31451,7	11837	16262,8	21206	33129,3	
MSPA (kg ha ⁻¹)								
S1	3434,4BCa	5259,3Aa	5547,1Aa	4935,1ABa	3042,0Ca	4517,7ABCa	5825,0Aa	4651,5
S2	3367,6CDa	4261,7BCa	5816,9ABa	2368,9Db	3396,3CDa	4091,6ABCa	6989,5Aa	4327,5
S3	3521,0Eb	4362,7BCa	4890,0ABa	2611,9DEb	3100,5BCDa	3989,0ABCa	6302,9Aa	4111,1
S4	1655,3Ca	4310,1BCa	5445,4ABa	3526,8Cab	3438,7Ca	4757,3BCa	6989,0Aa	4303,2
Média	2994,5	4548,4	5424,8	3360,6	3244,3	4338,9	6526,6	
MS (%)								
S1	16,1Da	18,0BCDa	17,1CDa	20,2ABb	18,5BCDa	20,1ABCa	21,8Aa	18,8
S2	16,2CDa	15,1Db	17,0BCDa	20,9Ab	18,3ABCa	20ABa	18,6ABCb	18
S3	16,4Ca	17,8Ca	17,2Ca	24,5Aa	18,7BCa	20,9Ba	19,6BCab	19,3
S4	16,7Ca	17,7BCab	17,6BCa	17,1BCc	19,4ABCa	21,2Aa	19,5ABab	18,4
Média	16,35	17,1	17,2	20,6	18,7	20,5	19,8	18,6
IAF (cm ² cm ⁻²)								
S1	4,3Ca	5,32ABCa	5,47ABa	4,52BCa	4,34Ca	4,72BCa	6,07Aa	4,96
S2	4,11CDa	4,75ABCa	5,58ABa	3,55Db	3,77CDa	4,71BCa	5,78Aa	4,6
S3	2,85Db	4,82BCa	5,13Ba	3,85CDab	4,24BCa	4,74BCa	6,22Aa	4,55
S4	4,48BCa	4,81BCa	5,43ABa	4,27Cab	4,15Ca	4,99ABCa	5,95Aa	4,86
Média	3,93	4,92	5,4	4,04	4,12	4,79	6	4,74

TEF (cm d ⁻¹)								
S1	3,09Aab	2,8Ab	2,68ABa	1,63Ca	1,11Da	2,28Bb	3,07Ab	2,38
S2	3,25ABab	3,05BCab	3,06BCa	1,01Dc	1,29Da	2,72Ca	3,57Aa	2,56
S3	2,86Bb	3,08ABab	2,84Ba	1,17Cbc	1,33Ca	2,78Ba	3,40Aab	2,49
S4	3,39Aa	3,37ABa	2,88BCa	1,52Dab	1,35Da	2,82Ca	3,56Aa	2,69
Média	3,14	3,07	2,86	1,33	1,27	2,65	3,4	2,53
PA (kg m ⁻³)								
S1	1,38Ca	2,8Ba	4,43Aa	2,48BCa	2,16BCb	2,23BCa	3,3ABc	2,68
S2	1,36CDa	2,27BCDa	4,9Aa	1,29Db	2,49BCab	2,52Ba	4,42Aab	2,75
S3	0,66Da	2,33BCa	4,3Aa	1,43CDb	2,68Bab	2,40BCa	3,85Abc	2,52
S4	1,42Ca	2,30BCa	4,61Aa	2,74Ba	3,23Ba	3,22Ba	5,00Aa	3,21
Média	1,2	2,42	4,56	1,98	2,64	2,59	4,14	

AD: altura do dossel; MSPA: massa seca da parte aérea; MSPA: massa seca da parte aérea; IAF: índice de área foliar; TEF: taxa de expansão da forragem; PA: Produtividade da água. Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na mesma linha e minúsculas na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si (p>0,05).

4.4. Conclusão

Para tubos gotejadores instalados a 20 cm da superfície do solo, a absorção de água pelas raízes do capim Mombaça ocorreu em até duas camadas abaixo dos emissores, 30 e 40 cm.

Como respostas produtivas para o capim Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial, a produtividade nos ciclos do período outono/inverno foi equivalente a cerca de 50% da produtividade alcançada no sétimo ciclo produtivo, conduzido na primavera.

Não houve efeito de espaçamento entre tubos gotejadores para a variável produtividade (MS kg ha⁻¹) no ciclo conduzido no inverno.

O ciclo 7, que foi o ciclo mais dependente da irrigação, foi o que alcançou maior produtividade de matéria seca e nele não houve efeito significativo dos espaçamentos entre tubos gotejadores.

O capim Mombaça responde bem à irrigação por gotejamento subsuperficial e é possível obter boas respostas biométricas e produtivas utilizando espaçamentos entre tubos gotejadores superiores a 1,0 m em Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico.

Na temática de irrigação por gotejamento subsuperficial em pastagens são necessários estudos adicionais para melhores inferências, incluindo o efeito do pastejo animal e a viabilidade econômica.

Referências

- ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CUNHA, F. F.; FIGUEIREDO, J. L. A. Produção de capins cultivados sob pastejo em diferentes lâminas de irrigação e estações anuais. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.6, p.680–686, 2009.
- ALLEN, R. G. et al. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998.
- ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CUNHA, F. F. Comportamento do sistema radicular de capins manejados por pastejo submetidos a diferentes lâminas de irrigação. *Engenharia na Agricultura, Viçosa – MG*, v.18 n.5, 2010.

- ALVES, C. P.; CIRINO JUNIOR, B.; ROCHA, A. K. P.; VIEIRA, D. S. M. M.; EUGÊNIO, D. S.; LEITE, M. L. M. V. Respostas morfofisiológicas das plantas forrageiras sob manejo de cultivo e pastejo: uma revisão. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 6, e10610615405, 2021. (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15405>
- APPLES, W. M.; KARIMI, R. Analysis of soil wetting patterns in subsurface drip irrigation systems – Indoor alfalfa experiments. *Agricultural Water Management*, 250, 2021.
- ARAÚJO, L. C.; SANTOS, P. M.; RODRIGUEZ, D.; PEZZOPANE, J. R. M. Key factors that influence for seasonal production of Guinea grass. *Scientia Agricola*, v.75, n.3, p.191-196, May/June 2018.
- AYARS, J. E.; FULTON, A.; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California – Here to stay? *Agricultural Water Management*. 157, 39 – 47, 2015.
- BORDOVSKY, J. P.; MUSTIAN, J. T. Evaluation of cotton establishment strategies using subsurface drip irrigation (sdi) in the southern high plains of Texas. *Engineering in Agriculture* 36(6): 891-904. 2020. doi: 10.13031/aea.14098
- BWAMBALE, E.; ABAGALE, F. K.; ANORNU, G. K. Data-driven model predictive control for precision irrigation management. *Smart Agricultural Technology*, 3, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100074>
- CARVALHO, A. L. S.; MARTUSCELLO, J. A.; ALMEIDA, O. G.; BRAZ, T. G. S.; CUNHA, D. N. F.V.; JANK, L. Production and quality of Mombaça grass forage under different residual heights. *Maringá*, v. 39, n. 2, p. 143-148, 2017.
- CUNHA, F. F.; RAMOS, M. M.; ALENCAR, C. A. B.; A. C.; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; OLIVEIRA, R. A. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. *Acta Scientiarum. Agronomy. Maringá*, v. 32, n. 2, p. 351-357, 2010.
- CUNHA, F. F.; RAMOS, M. M.; ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CECON, P. R.; ARAÚJO, R. A. S. Produtividade da *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés em diferentes manejos e doses de adubação, períodos de descanso e épocas do ano. *Idesia (Chile)* v.30, n.1, jan-abril, 2012.
- DALRI, A. B.; COELHO, A. P.; SILVA, V. C.; FARIA, R. T.; FISHER FILHO, J. A. Adaptation and responsiveness of sugarcane cultivars under irrigated and rainfed production systems. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.41, n.5, p.496-503, sep./oct. 2021.
- DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; FARIA, R. T.; MAZZONETTO, F.; CORBANI, R. Z. Uso da trifluralina no controle de intrusão radicular em gotejadores enterrados sob a cultura da cana-de-açúcar. *Irriga, Botucatu*, v. 20, n. 1, p. 82-91, janeiro-março, 2015.
- DRUMOND, L. C. D.; MENDONÇA, F. C.; ANDRADE, A. S.; APPELT, M. F.; AMORIM, D. M. Irrigação de pastagens. In: *Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: Técnica e Cultura*. Esalq – USP, 2021. FAO, 2022. <http://www.fao.org/aquastat/en/>
- FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. Maringá: Eudem, 2012.
- FU, B.; LI, Z.; GAO, X.; WU, L.; LAN, J.; PENG, W. Effects of subsurface drip irrigation on alfalfa (*Medicago sativa* L.) growth and soil microbial Community structures in arid and semi-arid areas of northern China. *Applied Soil Ecology*, 159, 2021.
- GAO, Y.; YANG, L.; SHEN, X.; LI, X.; SUN, J.; DUAN, A.; WU, L. Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 146, 1 – 10, 2014.

- GONÇALVES, I.Z.; BARBOSA, E. A. A.; SANTOS, L. N. S.; NAZÁRIO, A. A.; FEITOSA, D. R. C.; TUTA, N. F.; MATSURA, E. E. Water relations and productivity of sugarcane irrigated with domestic wastewater by subsurface drip. *Agricultural Water Management*, 185, 2017.
- JANK, L. RESENDE, R. M. S.; VALLE, C. B.; RESENDE, M. D. V.; CANÇADO, L. J.; SIMIONI, C. Melhoramento genético de *Panicum maximum*. *Melhoramento de forrageiras tropicais*, v.1, p. 55 – 87, 2008.
- 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. Seasonality of biomass production of irrigated Mombaça ‘Guinea grass’. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 2021, VOL. 71, n. 3, 156–164.
- KARIMI, R.; APPELS, W. M. Soil moisture dynamics in a new indoor facility for subsurface drip irrigation of field crops. *Irrigation Science*, 39, 715–724, 2021.
- LAMM, F. R.; CAMP, C. R. *Subsurface Drip Irrigation*. In: *Microirrigation for Crop Production*. Elsevier B.V. 2007.
- LAMM, F. R.; COLAIZZI, P. D.; SORENSEN, R. B.; BORDOVSKY, J. P.; DOUGHERTY, M.; BALKCOM, K.; ZACCARIA, D.; BALI, K. M.; RUDNICK, D. R.; PETERS, R. T. A 2020 vision of subsurface drip irrigation in the U.S. *Transactions of the ASABE*, 66(4), 1319-1343. 2021. <https://doi.org/10.13031/trans.14555>
- MARTUSCELLO, J. A.; RIOS, J. F.; FERREIRA, M. R.; ASSIS, J. A.; BRAZ, T. G. S.; CUNHA, D. N. F. V. Produção e morfogênese de capim BRS Tamani sob diferentes doses de Nitrogênio e intensidades de desfolhação. *Boletim de Indústria Animal, Nova Odessa*, v.76, p.1-10, 2019. <https://doi.org/10.17523/bia.2019.v76.e1441>
- MARTUSCELLO, J. A.; SILVA, L. P.; CUNHA, D. N. F. V.; BATISTA, A. C. S.; BRAZ, T. G. S.; FERREIRA, P. S. Adubação nitrogenada em capim Massai: morfogênese e produção. *Ciência Animal Brasileira*, v.16, p. 1-13. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1089-68916i118730>
- MELO, M. C.; GUIMARÃES, L. M.; SILVA, P. L.; CAMARGO, D. D.; DRUMOND, L. C. D. Crescimento e produtividade de *Brachiaria* adubada e irrigada por gotejamento subsuperficial. *Irriga, Botucatu*, v. 25, n. 1, p. 112-130, 2020.
- MO, Y.; LI, G.; WANG, D. A sowing method for subsurface drip irrigation that increases the emergence rate, yield, and water use efficiency in spring corn. *Agricultural Water Management*, 179, 288 – 295, 2017.
- MOCHEL FILHO, W. J. E.; CARNEIRO, M. S. S.; ANDRADE, A. C.; PEREIRA, E. S.; ANDRADE, A. P.; CNDIDO, M. J. D. S.; MAGALHÃES, J. A.; RODRIGUES, B. H. N.; SANTOS, F. J. S.; COSTA, N. L. Produtividade e composição bromatológica de *Panicum maximum* cv. Mombaça sob irrigação e adubação azotada. *Revista de Ciências Agrárias*, 39 (1), 81 – 88, 2016.
- MORENO, L. S. B.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; ALVES, R. R. Base temperature determination of tropical *Panicum* spp. grasses and its effects on degree-day-based models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 186, 26–33, 2014.
- MOTA, V. J. G.; CARVALHO, A. J.; OLIVEIRA, F. G.; GOMES, V. M.; MONÇÃO, F. P.; MOTA FILHO, V. J. V. Determinação do coeficiente de cultura do capim-mombaça manejado em diferentes estações do ano no semiárido mineiro. *Irriga, Botucatu*, v. 25, n. 1, p. 170-183, janeiro-março, 2020.
- OLIVEIRA, E. M.; MARTUSCELLO, J. A.; JANK, L.; CUNHA, D. N. F. V.; SANTOS, M. F. Evaluation of *Megathyrus maximus* genotypes under water stress conditions. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, v. 44, e54975, 2022. Doi 0.4025/actascianimsci.v44i1.54975
- OLIVEIRA, P. S.; HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; OLIVEIRA, W. C. M. Aplicações da agricultura de precisão em pastagens. *Circular Técnica 127*, Embrapa, Juiz de Fora, MG, 2023. ISSN 1678-037X

- PEDREIRA, C. G. Avanços metodológicos na avaliação de pastagens. Reunião anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 39, 100 – 150, 2022.
- PEDREIRA, C. G. S.; PEDREIRA, B. C.; BITTAR, C. M. M.; FAUSTINO, M. G.; SANTOS, V. P.; FERREIRA, L. S.; LARA, M. A. S. Produtividade e degradabilidade ruminal da forragem de capins da espécie *Panicum maximum*. *Nativa*, Sinop, v. 02, n. 03, p. 143-148, jul./set. 2014. ISSN: 2318 – 7670.
- PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Koppen–Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 2007.
- PEREIRA, V. V.; FONSECA, D. M.; MARTUSCELLO, J. A.; BRAZ, T. G. S.; SANTOS, M. V.; CECON, P. R. Características morfogênicas e estruturais de capim Mombaça em três densidades de cultivo adubado com nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.40, n.12, p.2681-2689, 2011.
- PRUDENTE JUNIOR, A. C. Utilização de sonda capacitiva FDR para estimativa do consumo de água e coeficiente da cultura de *Urochloa brizantha* cv Marandu em cultivo solteiro e consorciado. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2019.
- PRUDENTE JUNIOR, A. C.; MENDONÇA, F. C.; SOUZA, D. P.; BRETAS, L. M.; AMORIM, D. M. Calibration of FDR probe in eutrofic red nitisol. In: V Inovagri Meeting. Fortaleza: [s.n.], 2019.
- REIS, K. M.; BARRETO, A. C.; ZANINI, J. R. Vazão e uniformidade de distribuição de tubo gotejador em superfície e subsuperfície. *Irriga*, Botucatu, v.22, n.4, p. 690 – 700, out. – dez., 2017.
- REIS, M. M.; SANTOS, L. D. T.; OLIVEIRA, F. G.; SANTOS, M. V. Irrigação de pastagens tropicais: desafios e perspectivas. *Revista Unimontes Científica*, Montes Claros, v. 19, n.1 - jan./jun. 2017. (ISSN 2236-5257).
- SKAGGS, T.H.; TROUT, T.J.; ROTHFUSS, Y. Drip irrigation water distribution pattern: effects of emitter rate, pulsing and antecedent water. *Soil Science Society of America Journal*, v. 74, n.6, 2010. <https://doi.org/10.2136/sssaj.2009.0341>
- SANCHES, A. C.; GOMES, E. P.; RICKLI, M. E.; FRISKE, E.; FASOLIN, J. P. Productivity and nutritive value of tifton 85 in summer, with and without irrigation under different nitrogen doses. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.37, n.2, p.246-256, mar./abr. 2017.
- SANCHES, A. C.; SOUZA, D. P.; JESUS, F. L. R.; MENDONÇA, F. C.; GOMES, E. P.; PEZZOPANE, J. R. M. Comparison of water consumption estimates for tropical and winter forages by FDR probes and weighing lysimeters. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 40, n. 3, 2019.
- SANDHU, R.; IRMAK, S. Effects of subsurface drip-irrigated soybean seeding rates on grain yield, evapotranspiration and water productivity under limited and full irrigation and rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 267, 2022.
- SANTOS, F. L. V.; DELMOND, J. G.; VIDAL, V. M.; CUNHA, F. N.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; GOMES, F. H. F.; C, R. A. Dimensões de bulbo molhado em sistema de irrigação por gotejamento. *Water Resources and Irrigation Management*, v.4, n.1-3, p.1-7, 2015.
- SANTOS, L. N. S.; MATSURA, E. E.; GONÇALVES, I. Z.; BARBOSA, E. A. A.; NAZÁRIO, A. A.; TUTA, N. F.; ELAIUY, M. C. L.; FEITOSA, D. R. C.; SOUSA, A. C. M. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agricultural Water Management* 170, 2016.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J.A.; ARAÚJO FILHO, A.; J.C., OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. Brazilian agricultural research corporation. Brazilian soil classification system, 5 ed. Embrapa Soils, Brasília, p. 564, 2018.

- SOUZA, C. F.; BIZARI, D. R. Soil solution distribution in subsurface drip irrigation in sugarcane. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.38, n.2, p.217-224, 2018.
- SOUZA, D. P.; SANCHES, A. C.; MENDONÇA, F. C.; MAFFEI, R. G.; CATTO, P. J. Características produtivas de três espécies forrageiras irrigadas. *Irriga*, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI, p. 99-107, 2016.
- VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; GARGANTINI, P. E.; LIMA, R. C. Qualidade de forragem de capim Mombaça sob irrigação na Região oeste do estado de São Paulo. XVI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Goiânia, 2006.
- WANG, H.; WANG, N.; QUAN, H.; ZHANG, F.; FAN, J.; FENG, H.; CHENG, M.; LIAO, Z.; WANG, X.; XIANG, Y. Yield and water productivity of crops, vegetables and fruits under subsurface drip irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 269, 2022.
- WANG, X.; LIU, R.; LUO, J.; ZHU, P.; WANG, Y.; PAN, X.; SHU, L. Effects of water and NPK fertigation on watermelon yield, quality, irrigation-water, and nutrient use efficiency under alternate partial root-zone drip irrigation. *Agriculture Water Management*, 271, 2022.

5. USO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS PARA A OBTENÇÃO DO ÍNDICE NDVI EM CAPIM MOMBAÇA IRRIGADO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL COM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS ENTRE TUBOS GOTEJADORES

Resumo

O objetivo desse trabalho foi analisar espacialmente o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em área cultivada com capim Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial sob diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores ao longo de um ciclo produtivo. O estudo foi realizado em uma área experimental da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, localizada em Piracicaba – SP. Os tubos gotejadores foram espaçados em 2,0 m (S1), 1,5 m (S2), 1,2 m (S3) e 1,0 m (S4). O monitoramento do conteúdo de água no solo foi realizado via sonda capacitiva FDR e, com base nesse monitoramento, foi conduzido o manejo da irrigação. Um sistema de aeronave não tripulada (UAS), modelo Matrice 600 Pro da DJI®, embarcado com uma câmera Altum da Micasense®, foi utilizado para a obtenção de imagens multiespectrais em voos sobre a área experimental submetida aos diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores. Os voos foram realizados entre às 12h e 14h, horário local, em dias e céu claro e sem nuvens. As imagens foram processadas no software Agisoft Metashape Professional Edition 1.5.4 (Agisoft®, St. Petersburg, Rússia), resultando nos modelos digitais finais de elevação e ortomosaicos. Os valores de NDVI para as áreas cultivadas com o Mombaça foram gerados no software QGIS. A partir da série temporal de NDVI gerada, análises de estatística descritiva foram realizadas para obtenção da média, do máximo, do mínimo e do desvio padrão para comparação entre as respostas de NDVI obtidas para cada espaçamento entre tubos gotejadores utilizado. As camadas de 0,40 a 0,50 m e de 0,50 a 0,60 m foram aquelas nas quais houve as menores diferenças entre as leituras de conteúdo de água no solo ao longo do ciclo produtivo. Os menores valores para NDVI foram registrados no início do ciclo, em razão do período de rebrotação da pastagem, aos 1 DAC e 6 DAC. A partir dos 12 DAC, observou-se que, ao longo do tempo, a variação nos valores de NDVI foi mínima indicando bom vigor da pastagem e fechamento do dossel antes do final do ciclo. Com base nos resultados obtidos nesse estudo para altura de dossel e NDVI, a duração do ciclo produtivo poderia ter sido inferior aos 28 dias que foram considerados. Não houve diferença estatística ($p > 0,05$) para os valores de produção alcançados nos diferentes espaçamentos e os índices NDVI registrados no final do ciclo foram muito similares para os diferentes espaçamentos, com valores médios entre $0,93 \pm 0,03$ e $0,94 \pm 0,02$. O vigor e estruturação da pastagem não foi afetado pela diferença nos espaçamentos entre tubos gotejadores.

Palavras-chave: análise espectral, NDVI, gotejamento subsuperficial, capim-mombaça.

Abstract

This study aimed to spatially analyze the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in an area cultivated with Mombaça grass and irrigated under subsurface drip using different spacing between drip lines throughout a production crop cycle. The study was carried out in an experimental area of the Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba - SP, Brazil. The drip lines were spaced at 2.0 m (S1), 1.5 m (S2), 1.2 m (S3), and 1.0 m (S4). The monitoring of the water content in the soil was carried out via FDR capacitive probe and based on this monitoring, the irrigation management was performed. An unmanned aerial vehicle (UAV), model Matrice 600 Pro from DJI®, onboard with an Altum camera from Micasense®, was used to obtain multispectral images in flights over the experimental irrigated area by SDI with different spacing between drip lines. The flights were performed between 12 am and 14 pm local time, on clear days and cloudless skies. The images were processed using the Agisoft Metashape Professional Edition 1.5.4 software (Agisoft®, St. Petersburg, Russia), resulting in the final digital elevation and orthomosaic models. NDVI values for areas cultivated with Mombasa were generated in QGIS

software. From the generated NDVI time series, descriptive statistical analyses were performed to obtain the mean, maximum, minimum, and standard deviation for comparison between the NDVI responses obtained for each spacing between drip lines used. The soil layers from 0.40 to 0.50 m and from 0.50 to 0.60 m were those in which there were the smallest differences between the readings of water content in the soil throughout the production crop cycle. The lowest values for NDVI were recorded at the onset of the cycle, due to the pasture regrowth period, at 1 DAC and 6 DAC. From the 12 DAC, it was observed that, over time, the variation in NDVI values was minimal, indicating good pasture vigor and canopy closure before the end of the crop cycle. Based on the results obtained in this study for canopy height and NDVI, the duration of the production cycle could have been less than the 28 days that were considered. There was no statistical difference ($p > 0.05$) for the production values reached in the different spacings. The NDVI indexes recorded at the end of the crop cycle were very similar for the different spacings, with mean values between 0.93 ± 0.03 and 0.94 ± 0.02 . The vigor and structure of the pasture were not affected by the difference in spacing between drip lines.

Keywords: spectral analyses, NDVI, subsurface drip irrigation, Mombaça guinea grass.

5.1. Introdução

No contexto global de sustentabilidade e da busca por estratégias visando à segurança alimentar, é fundamental que o aumento da produção agrícola esteja associado ao manejo eficiente da água na agricultura. Esse é um resultado alcançável a partir do uso de tecnologias na agricultura moderna.

Nesse cenário da agricultura moderna, o uso de veículos aéreos não tripulados (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs, ou drones) tem forte potencial de aplicação, possibilitando, entre outras finalidades, que campos de cultivo sejam monitorados e informações sejam geradas a partir de ferramentas de sensoriamento remoto com alta resolução espacial e temporal (GAGO *et al.*, 2015; BIAN *et al.*, 2019). Soluções baseadas no uso de drones já são desenvolvidas e projetadas especificamente para atuar na coleta de dados de culturas, mapeamento de terrenos, análise de superfície, detecção de pragas e estresse hídrico, com aplicabilidade no manejo de irrigação (BIKOV *et al.*, 2022).

Na irrigação é fundamental o monitoramento eficiente dos vários parâmetros relacionados ao sistema solo-planta-atmosfera que afetam o crescimento e desenvolvimento da cultura (ABIOYE *et al.*, 2020). Tal monitoramento pode ser realizado a partir de ferramentas de sensoriamento remoto que fornecem informações espaciais e temporais da vegetação (GAO *et al.*, 2017). Imagens multiespectrais que podem ser geradas a partir de sensores embarcados em drones têm sua importância na irrigação, ao passo que possibilitam a obtenção e o monitoramento de dados relacionados ao estresse hídrico das culturas e ao seu vigor, que, por sua vez, contribui para tomadas de decisão no manejo da irrigação. É um método não destrutivo e que pode atender a grandes campos (Gago *et al.*, 2015; PETRIE *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2021; ABIOYE *et al.*, 2020).

Uma técnica considerada padrão com o uso de drones na agricultura é a geração de um mosaico do terreno a partir de um conjunto de imagens multiespectrais sequenciais para o cálculo de índices de vegetação (ALEOTTI *et al.*, 2018). A estimativa de índices de vegetação é uma das formas de extrair informações das culturas a partir de imagens digitais (RASMUSSEN *et al.*, 2016). Um dos índices de vegetação mais comumente utilizados no contexto da agricultura é o índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI, que é baseado na reflectância das bandas espectrais do infravermelho próximo – NIR e do vermelho – RED, e está relacionado à atividade fotossintética das plantas (VALLE JÚNIOR *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2023).

O uso do NDVI proporciona visibilidade geral da saúde da lavoura, indicando áreas com possíveis problemas e proporcionando ações mais assertivas em campo (BIKOV *et al.*, 2022). Os valores de NDVI variam de -1 a 1, de modo que quanto maior o vigor vegetativo e mais densa for uma vegetação, mais o valor do índice se aproxima de 1 (ALFACE *et al.*, 2019). A aplicação do NDVI em estudos com pastagens tem sido feita para detecção de áreas com pastagens degradadas e nível de degradação (VALLE JÚNIOR *et al.*, 2019), estimativa da taxa de crescimento de pastagens (HILL *et al.*, 2004) e da relação entre NDVI e a evapotranspiração da pastagem (ALAM *et al.*, 2018). Tais aplicações tendem a ser mais exploradas com a forte presença da tecnologia na agricultura e a intensificação da produção animal a pasto.

No contexto da irrigação, o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial - SDI conduz água e nutrientes diretamente para a zona radicular das plantas, mantendo a superfície do solo seca, o que elimina as perdas de água por evaporação e escoamento superficial, além de minimizar o surgimento de plantas daninhas (ÇOLAK *et al.*, 2015). Como as aplicações de água ocorrem em profundidade, avaliações de operação do sistema e da uniformidade de aplicação são mais difíceis (LAMM e CAMP, 2007). Nesse sentido, o monitoramento da área irrigada a partir de imagens multiespectrais pode ser útil na detecção de falhas de aplicação de água, indicando a ocorrência de eventuais problemas no sistema de irrigação, como também pode ser útil na definição do espaçamento ótimo entre tubos gotejadores para uma determinada cultura.

O objetivo desse trabalho foi avaliar espacialmente o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em capim Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial com diferentes espaçamentos entre tubos gotejadores (linhas laterais), gerando informações da variabilidade do vigor vegetativo da cultura e relacionando os resultados ao espaçamento entre linhas laterais de gotejo.

5.2. Materiais e Métodos

O estudo foi conduzido em uma área experimental da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, localizada em Piracicaba - SP, 22° 42' 14,6" S e 47° 37' 21,2" O, com altitude média de 569 m acima do nível do mar. O clima que prevalece na área de estudo é o subtropical úmido com inverno seco e verão quente, categorizado como Cwa conforme a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). O solo da área onde foi conduzido o estudo é classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico (SANTOS *et al.*, 2018), algumas de suas propriedades físicas e químicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas do solo da área experimental.

PT (cm ³ cm ⁻³)		Ds (g cm ⁻³)				Argila (%)			Silte (%)		Areia (%)		
0,48		1,48				56,18			15,40		28,43		
Cam	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S	CTC	V%	m%	S
	CaCl ₂		(resina)										SO ₄
Cm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³								V%	m%	mg dm ⁻³
0-20	6,4	34	73,5	5,2	44,5	26,0	14,5	0	76	90,5	83,5	0	3,5
20-40	5,7	23	17,5	2,3	28,0	17,0	21,5	0	47,5	69,0	69,0	0	25,5
Cu		Fe			Zn			Mn		B			
													(água quente)
0-20	4,1		11,4			2,9			32				0,3
20-40	4		14,6			1,4			26,8				0,2

* PT: porosidade total; Ds: densidade do solo; Cam: camada; pH CaCl₂: potencial hidrogeniônico determinado em CaCl₂; MO: matéria orgânica; P (resina): fósforo disponível extraído pelo método da Resina de Troca Iônica; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; H+Al: acidez potencial; Al: alumínio trocável; S: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação de bases; m%: saturação de alumínio; S SO₄: enxofre (sulfato); Cu: cobre; Fe: ferro; Zn: zinco; Mn: manganês; B: boro.

Para a execução do estudo, quatro áreas de 135 m² foram individualizadas e preparadas para o cultivo do capim Mombaça. O capim foi semeado a lanço com uma densidade de semeadura de 15 kg ha⁻¹. Previamente à ação de semeadura, o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial foi instalado nessas áreas com diferentes espaçamentos entre os tubos gotejadores, a saber, 2,0 m (S1), 1,5 m (S2), 1,2 m (S3) e 1,0 m (S4). Os emissores do sistema utilizado eram autocompensantes e com dispositivos anti-sifão, espaçados no tubo gotejador a uma distância de 0,50 e possuíam vazão de 1,0 L h⁻¹. A profundidade de instalação dos tubos gotejadores foi de 0,20 m. O período de estabelecimento da pastagem compreendeu os meses entre setembro de 2019 e janeiro de 2020, sendo, posteriormente, conduzidos sete ciclos produtivos.

Os dados climáticos obtidos durante o período experimental tiveram como fonte a estação meteorológica automática da Esalq/USP, situada a 50 m da área experimental. Foram consultados e utilizados dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e chuva. A evapotranspiração de referência (ET_o, mm dia⁻¹) foi estimada pelo método de Penman-Monteith, FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998).

Durante o período de estudo, o monitoramento do conteúdo de água no solo foi realizado em uma frequência de dois dias via sonda capacitiva FDR – Frequency Domain Reflectometry. Para utilização da sonda foram instalados, conforme manual do fabricante, três tubos de acesso de PVC para cada espaçamento entre tubos gotejadores (S1, S2, S3 e S4), com cada tubo de acesso distante 0,25 m da localização do emissor (FRIZZONE *et al.*, 2012). Nos eventos de leitura realizados antes dos eventos de irrigação, o uso da sonda fazia uma varredura da frequência relativa (FR) a cada 0,10 m numa profundidade útil de 0,8 m (0,10 m; 0,20 m; 0,30 m; 0,40 m; 0,50 m; 0,60 m; 0,70 m e 0,80 m). Posteriormente, os valores obtidos foram convertidos em valores de umidade do solo com base em equações de calibração obtidas para as condições locais, conforme processo descrito por Prudente Júnior *et al.* (2019). Com base na profundidade efetiva do sistema radicular do Mombaça, as leituras do conteúdo de água no solo nas profundidades de 0,10 a 0,20 m, 0,20 a 0,30 m, 0,30 a 0,40 m foram aquelas consideradas no manejo da irrigação (ALENCAR *et al.*, 2010).

A irrigação foi realizada de modo manter a umidade do solo entre a capacidade de campo (θ_{cc}) e a umidade crítica (θ_{crit}), visando garantir a ausência de déficit hídrico para o desenvolvimento da cultura. O

armazenamento de água no solo foi estimado por meio da integração dos valores de umidade obtidos a partir da frequência relativa registrada pela sonda capacitiva e submetida às equações de calibração. A partir dos dados de conteúdo atual de umidade do solo (θ_a) por camada, a lâmina líquida de irrigação necessária (LI) foi estimada (equação 2) para posterior estimativa da lâmina bruta de irrigação (LB), considerando a eficiência de aplicação do sistema (ea). A partir da relação entre lâmina bruta de irrigação e lâmina aplicada por hora (Lh), o tempo de irrigação necessário (TI) foi calculado.

$$LI = (\theta_{cc} - \theta_a) * Z \quad \text{Equação 2}$$

$$Lh = \frac{q}{Se * SL} \quad \text{Equação 3}$$

$$TI = \frac{LB}{Lh} \quad \text{Equação 4}$$

Em que,

LI – Lâmina líquida de irrigação necessária, mm;

θ_a – Umidade atual do solo; $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_{cc} – Umidade de capacidade de campo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

Z – Profundidade considerada para o manejo de irrigação, mm.

Lh – Lâmina aplicada por hora, mm/h;

q – Vazão por metro linear, L/h/m;

Se – Espaçamento entre emissores, m;

SL – Espaçamento entre linhas, m;

TI – Tempo de irrigação, h;

LB – Lâmina bruta de irrigação, mm.

Dos ciclos conduzidos em 2020, o sétimo ciclo teve início em 24/09/2020 e fim em 21/10/2020, contemplando o período da primavera, na estação seca (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Durante esse período foram realizados voos com um veículo aéreo não tripulado (UAV), modelo Matrice 600 Pro da DJI®, embarcado com uma câmera Altum da Micasense® para a obtenção das imagens multiespectrais (Figura 1). A câmera possui sensores multiespectrais que contemplam as bandas azul (centro de 475 nm, largura de banda de 20 nm), verde (centro de 560 nm, largura de banda de 20 nm), vermelho (centro de 668 nm, largura de banda de 10 nm), borda vermelha (centro de 717 nm, largura de banda de 10 nm) e infravermelho próximo (centro de 840 nm, largura de banda de 40 nm).



Figura 1. Veículo aéreo não tripulado, modelo Matrice 600 Pro da DJI®, embarcado com uma câmera Altum da Micasense.

A rota de voo automática foi definida previamente no aplicativo DJI Pilot®, como também as configurações para obter uma sobreposição entre fotos e entre linhas de voo de 75%. Os voos foram realizados entre as 12h e 14h, horário local, em dias de céu claro e sem nuvens. As condições meteorológicas médias para os dias de realização das campanhas de voo são elencadas na Tabela 2.

Tabela 2. Médias diárias das variáveis climáticas referentes aos dias das campanhas de voo com o UAV.

Dia	DAC	T _{máx} (°C)	T _{méd} (°C)	T _{mín} (°C)	UR (%)	U ₂ (m s ⁻¹)	Rad. Sol (w m ⁻²)	Ppt (mm)	ETo (mm)
25/09/2020	1	32,59	23,54	14,76	58,99	1,4	284,95	0	5,34
28/09/2020	4	37,45	26,08	19,74	59,47	1,99	204,17	0	4,87
30/09/2020	6	39,75	28,77	18,06	52,36	1,55	250,35	0	5,97
02/10/2020	8	40,42	32,1	23,33	37,23	1,53	263,19	0,76	7,28
06/10/2020	12	40,33	31,69	22,95	40,59	1,92	258,68	0	7,4
13/10/2020	19	35,97	25,97	15,06	52,83	1,54	266,55	0	5,83
17/10/2020	23	29,14	20,52	14,05	66,04	2,89	298,84	0	5,3
21/10/2020	27	33,1	24,3	18,2	67,6	2,4	251,5	0	5,16

* DAC: dias após o corte; T_{máx}: temperatura máxima; T_{méd}: temperatura média; T_{mín}: temperatura mínima; UR: umidade relativa do ar; U₂: velocidade do vento a 2 m; Rad. Sol: radiação solar; Ppt: precipitação pluvial; ETo: evapotranspiração de referência, FAO-56.

As imagens foram posteriormente processadas no software Agisoft Metashape Professional Edition 1.5.4 (Agisoft®, St. Petersburg, Rússia), resultando nos modelos digitais finais de elevação e ortomosaicos. Os valores de NDVI para as áreas cultivadas com o Mombaça foram gerados no software QGIS, utilizando a equação 3.

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \quad (3)$$

Em que:

NDVI – índice de vegetação por diferença normalizada;

NIR – reflectância na região do infravermelho próximo (nm);

R – reflectância na região do vermelho (nm).

A partir da série temporal de NDVI gerada, análises de estatística descritiva foram realizadas para obtenção da média, máximo, mínimo e desvio padrão, possibilitando realizar a comparação entre as respostas de NDVI obtidas para cada espaçamento entre tubos gotejadores utilizado.

A altura do dossel foi medida ao longo do ciclo utilizando um bastão graduado para medição a partir da superfície do solo até a folha mais expandida, totalizando cinco amostragens por tratamento. Para obtenção dos dados produtivos da cultura, foi utilizado um quadrado amostrador de 0,25 m² de área (0,5 m x 0,5 m) para cortar a forragem contida na sua área delimitada, mantendo uma altura de resíduo de 0,35 m, considerando cinco repetições por tratamento. A partir das amostras coletadas, foram feitas subamostras para realizar a separação botânica em folha, colmo e material morto, seguindo-se com a pesagem em balança eletrônica. Posteriormente, as subamostras foram submetidas a secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C, até atingir peso constante. Após a secagem, novas pesagens foram feitas para a quantificação da produtividade de massa seca da parte aérea (kg MS ha⁻¹).

Os dados medidos e estimados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos ($p < 0,05$), foi realizada a comparação das respectivas médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Relações entre as variáveis estudadas também foram realizadas por análise de regressão.

5.3. Resultados e Discussão

Os dados climáticos registrados durante o período experimental são apresentados na Figura 2. As condições climáticas do período resultaram em uma evapotranspiração de referência que variou de 1,48 mm a 7,4 mm, e seguiu o perfil de variação da radiação solar e da temperatura. A precipitação pluvial acumulada no período foi de 9,7 mm, o menor valor com relação aos ciclos de crescimento e corte de forragem. De modo geral, a variação de temperatura foi adequada para o desenvolvimento de gramíneas tropicais. Apesar da ocorrência de poucos dias com temperaturas mínimas abaixo dos 15°C, a amplitude térmica para esses dias foi alta, tendo em vista o registro de temperaturas máximas acima dos 29°C para tais dias. Picos de temperatura máxima acima dos 40 °C foram registrados.

De acordo com Yamori *et al.* (2014), a faixa ideal de temperatura de crescimento para espécies de *Panicum maximum* (syn *Megathyrsus maximum*) é de 30° a 40°C. Por outro lado, essas plantas praticamente paralisam seu desenvolvimento no inverno (PEREIRA *et al.*, 2011). Conforme Mota *et al.* (2020), para o campim Mombaça há estacionalidade de produção quando as temperaturas mínimas se aproximam dos 15°C. Jesus *et al.* (2021) concluíram que houve limitação pela temperatura na produção do capim Mombaça em Piracicaba – SP, mesmo sob condições de disponibilidade hídrica adequada, com resultados produtivos no outono/inverno abaixo dos alcançados na primavera/verão. De acordo com resultados obtidos por Vicedo *et al.* (2019), temperaturas elevadas combinadas com ausência de limitação de água e nutrientes promovem boas respostas em espécies de *Panicum maximum* (syn *Megathyrsus maximum*) refletindo em altas produções de biomassa. Os maiores valores para temperatura média foram

registrados até os 12 DAC (Figura 2). De acordo com Pereira *et al.* (2021), plantas submetidas a temperaturas crescentes respondem com o aumento da taxa de aparecimento foliar, contribuindo para o fechamento do dossel.

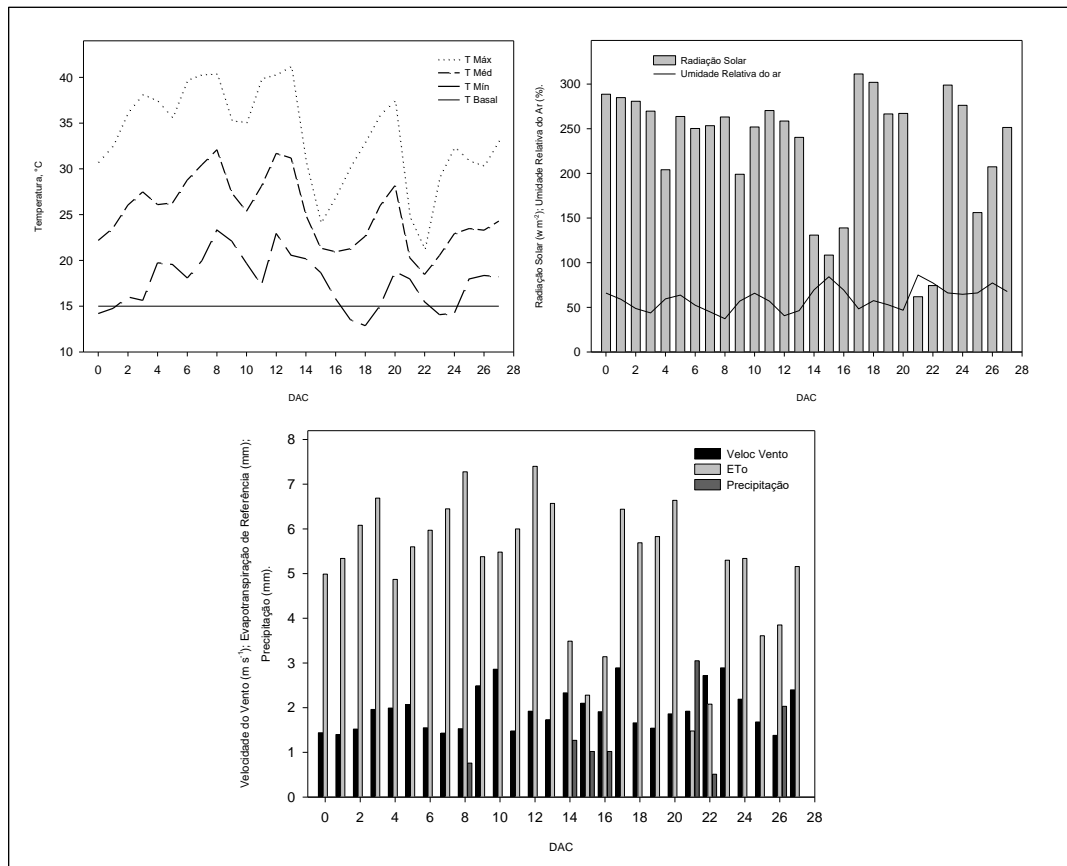


Figura 2. Médias diárias das variáveis climáticas temperatura máxima, média e mínima do ar (°C), radiação global (w m^{-2}), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s^{-1}), precipitação (mm) e evapotranspiração de referência FAO-56 (mm) durante o sétimo ciclo produtivo do Mombaça, set/20 a out/20.

A partir dos dados coletados via sonda capacitiva ao longo do ciclo produtivo em estudo, foi gerado o perfil do conteúdo de água no solo por camada (Figura 3). No SDI, a água é aplicada em profundidade, com ponto de emissão abaixo da camada superficial do solo, resultando em uma superfície de solo mais seca, o que reduz as perdas de água por evaporação (KANDELOUS *et al.*, 2010). Dado que nesse estudo os tubos gotejadores foram instalados à profundidade de 0,20 m, o conteúdo de água no solo nas profundidades de 0 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 m na ausência de precipitação pluvial foi dependente do processo de ascensão capilar, que atingiu valor máximo de 0,13 m em uma área sem cultivo e com tempo de irrigação de quatro horas, com lâmina d'água de 4 mm dia⁻¹.

Observou-se que S1 e S4 foram os espaçamentos em que as camadas iniciais de 0 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 apresentaram leituras com umidade do solo acima do ponto de murcha permanente e abaixo da capacidade de campo, sobretudo em S4. Os tubos gotejadores estavam espaçados em 1,0 m em S4, resultando em uma maior porcentagem de área molhada com dinâmica de avanço da frente de umedecimento também na vertical por ascensão capilar. Já em S1, espaçamento de 2,0 m entre tubos gotejadores, havia touceiras mais espaçadas, como resultado de um processo de germinação não tão efetivo como nos demais espaçamentos, o que possivelmente resultou em menor competição por água e possibilitou um maior conteúdo de água na camada do solo de 0,10 a 0,20 m.

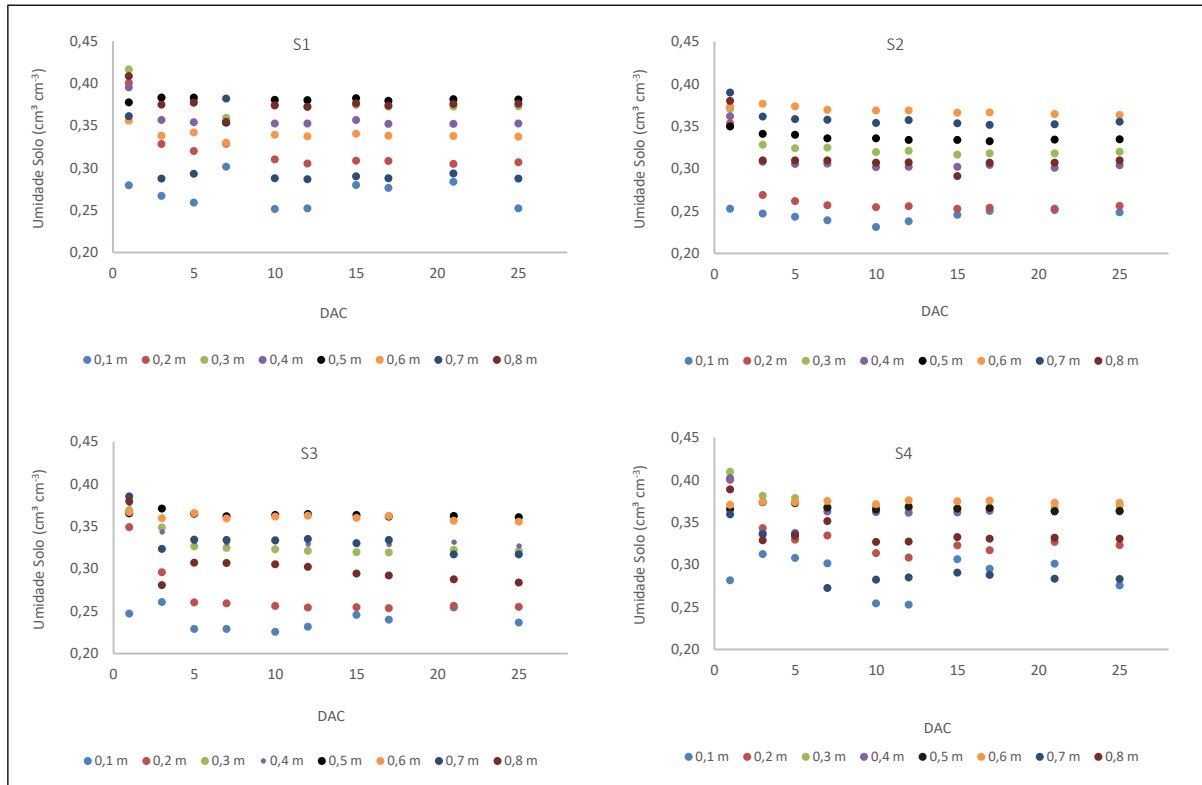


Figura 3. Conteúdo médio de umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em S1, S2, S3 e S4 durante o sétimo ciclo produtivo do capim Mombaça em um Nitossolo, Piracicaba-SP.

Os limites de umidade do ponto de murcha permanente e da capacidade de campo para as profundidades consideradas no manejo da irrigação ficaram entre $0,29$ e $0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Observou-se que as profundidades de $0,20$ a $0,30$ e de $0,30$ a $0,40$ m chegaram a alcançar a capacidade de campo, havendo também a ocorrência de excedentes hídricos; o maior deles, de $0,022 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, ocorreu na camada de $0,20$ a $0,30$ m aos 3 DAC. Em sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial é comum a saturação do solo na área próxima ao emissor (KANDELOUS *et al.*, 2010), que pode favorecer a redução de problemas relacionados à obstrução do emissor por intrusão radicular. Após um evento de irrigação, a umidade na capacidade de campo não é alcançada de forma simultânea em todas as dimensões do volume do bulbo, pois o processo de redistribuição da água no solo, que decorre da diferença de potencial entre diferentes pontos, resulta em diferentes valores de umidade para as diferentes direções de fluxo no volume do bulbo (SANTOS *et al.*, 2016).

As camadas de $0,40$ a $0,50$ m e de $0,50$ a $0,60$ m foram aquelas nas quais houve as menores diferenças entre as leituras de conteúdo de água no solo ao longo do ciclo produtivo. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Apples e Karimi (2021) em um cultivo de alfafa irrigado por SDI em profundidades de $0,20$ m e de $0,30$ m. Os autores observaram maior dinâmica na umidade do solo em uma camada abaixo dos emissores, fato este atribuído à uma maior taxa de absorção de água pelas raízes. Melo (2018) realizou um estudo com *Brachiaria brizantha* cv. Marandu irrigada por gotejamento subsuperficial com tubos gotejadores instalados a $0,20$ m, espaçados em $1,0$ m e com distância entre emissores de $0,30$ m em latossolo verde-amarelo. O autor identificou que as maiores variações do conteúdo de água ocorreram nas primeiras camadas do solo e em pontos mais distantes da fita gotejadora, a $0,5$ m de distância dela.

Na Tabela 3 encontram-se os dados resultantes da análise de estatística descritiva para os índices NDVI obtidos ao longo do tempo, contemplando o último dia do sexto ciclo produtivo (42 DAC) e os dias após o corte do sétimo ciclo produtivo. Na Figura 4 é apresentado o perfil do NDVI ao longo do tempo com base nesses dados.

Tabela 3. NDVI médio e desvio padrão ao longo do tempo para os diferentes espaçamentos S1, S2, S3 e S4.

Espaçamento	42 DAC Ciclo 6	1 DAC Ciclo 7	4 DAC Ciclo 7	6 DAC Ciclo 7	8 DAC Ciclo 7	12 DAC Ciclo 7	19 DAC Ciclo 7	23 DAC Ciclo 7	27 DAC Ciclo 7
S1	0,95±0,02	0,78±0,09	0,77±0,09	0,83±0,09	0,87±0,07	0,93±0,04	0,92±0,04	0,92±0,03	0,93±0,03
S2	0,95±0,02	0,82±0,07	0,82±0,07	0,87±0,06	0,90±0,05	0,95±0,03	0,93±0,04	0,93±0,03	0,94±0,02
S3	0,94±0,03	0,80±0,08	0,79±0,08	0,86±0,08	0,91±0,06	0,93±0,04	0,92±0,04	0,92±0,03	0,94±0,02
S4	0,95±0,02	0,79±0,07	0,79±0,08	0,86±0,07	0,90±0,05	0,94±0,03	0,92±0,03	0,93±0,03	0,94±0,02

S1: 2,0 m; S2: 1,5 m; S3: 1,2 m; S4: 1,0 m; DAC: dias após o corte.

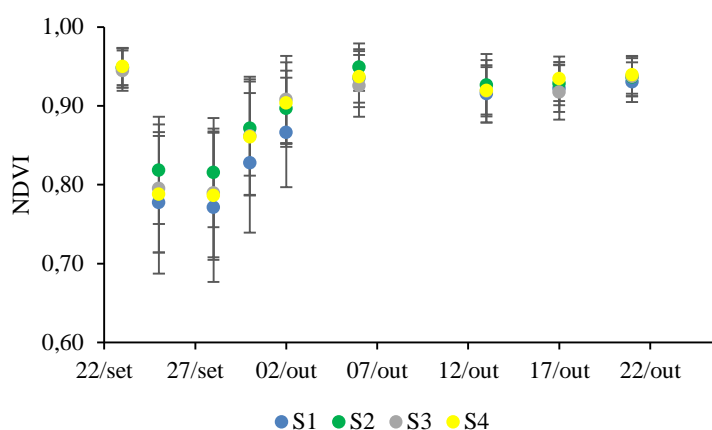


Figura 4. Perfil do NDVI ao longo do tempo contemplando o último dia do sexto ciclo produtivo do Mombaça e os dias após o corte no sétimo ciclo produtivo.

Os maiores valores foram obtidos nos períodos finais do ciclo produtivo. Pode-se observar a dinâmica de rebrota do Mombaça comparando-se o NDVI aos 42 DAC, final de um ciclo de inverno, com o NDVI obtido nos dias após o corte para o ciclo seguinte. A partir dos 12 DAC, observou-se que, ao longo do tempo, a variação nos valores de NDVI foi mínima (Tabela 3 e Figura 4), indicando bom vigor da pastagem e fechamento do dossel antes do final do ciclo.

Aos 12 DAC, a altura do dossel já tinha ultrapassado os 0,90 m em todos os espaçamentos utilizados. De acordo com Carnevalli *et al.* (2006), 90 cm é a altura recomendada para início do pastejo, considerando o alcance de 95% de interceptação luminosa, tendo em vista o aumento de material morto e a diminuição do percentual de lâminas foliares e do teor de proteína. O critério de interromper a rebrotação aos 95% de interceptação luminosa corresponde à ocorrência de maior taxa de acúmulo de folhas e é possível de ser identificada em campo com base na altura do dossel (PEDREIRA *et al.*, 2009). Há de se considerar que o fechamento do dossel potencializa o autossombreamento, compromete a qualidade da luz que chega na base da touceira e, por consequência, aumenta a taxa de senescência foliar (PEREIRA *et al.*, 2011). Com base nos resultados obtidos nesse estudo para altura de dossel e NDVI, a duração do sétimo ciclo produtivo poderia ter sido inferior aos 28 dias considerados.

De modo geral, a pastagem apresentou bom vigor de rebrota, sem sinais de degradação. Os menores valores para NDVI foram registrados no início do ciclo, em razão do período de rebrotação da pastagem, aos 1 DAC e 6 DAC, quando há mais áreas de solo exposto (Figura 5). Não houve diferença estatística ($p > 0,05$) para os valores de produção alcançados nos diferentes espaçamentos e os índices NDVI registrados no final do ciclo foram muito similares para os diferentes espaçamentos, com valores médios entre $0,93 \pm 0,03$ e $0,94 \pm 0,02$ (Tabela 4), o que permite inferir que o vigor e estruturação da pastagem não foi afetado pela diferença nos espaçamentos entre tubos gotejadores.

O acúmulo de forragem por dia foi superior aos 200 kg MS ha⁻¹, similar aos resultados obtidos por Jesus *et al.* (2021), que alcançaram uma média de 214,2 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ no período primavera/verão para capim Mombaça irrigado em Piracicaba – SP. Sanches *et al.* (2019) registraram acúmulos médios diários de 195,6 e 211,4 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ para capim Mombaça cultivado sob irrigação na primavera e no verão, respectivamente. Melo *et al.* (2020) registraram uma taxa de acúmulo de massa seca de 72,8 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ aos 34 dias após a uniformização do capim Marandu. De acordo com os autores, fatores climáticos contribuíram para esse baixo valor.

Com relação ao NDVI, os valores obtidos nas imagens tiradas um dia antes do final do ciclo, 27 DAC, ficaram bem próximos a 1, e com valores médios muito similares. Valores de NDVI mais próximos de 1 são indicativos de altas densidades de plantas e de uma vegetação saudável (CORDEIRO *et al.*, 2017). Ao diferenciar graus de degradação em pastagens tropicais em áreas da região Nordeste do estado de São Paulo utilizando índices de vegetação, Passos (2021) obteve um NDVI médio de 0,79 para o grupo de pastagens saudáveis, com valor máximo de 0,87. Já para o grupo de pastagens com solo exposto, o NDVI médio foi de 0,6, com valor máximo de 0,75. Cordeiro *et al.* (2017) obtiveram valores para NDVI de 0,58 no inverno e 0,70 no verão para regiões de campos do Rio Grande do Sul com áreas ocupadas por gramíneas. Simões *et al.* (2015), ao analisarem as respostas produtivas do capim Tifton 85 à adubação nitrogenada a partir do NDVI, registraram valores de NDVI de, aproximadamente, 0,70 na maior dose de N utilizada, 200 kg ha⁻¹. De acordo com os autores, imagens multiespectrais de dosséis permitem avaliar a adubação nitrogenada em pastagens de *Cynodon*.

Tabela 4. Dados produtivos e de NDVI alcançados no cultivo de capim Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial no ciclo conduzido em set/out de 2020.

	kg MS ha ⁻¹	kg MS ha ⁻¹ dia ⁻¹	NDVI 27 DAC
S1	5825,0	208,04	0,93±0,03
S2	6989,5	249,63	0,94±0,02
S3	6302,9	225,10	0,94±0,02
S4	6989,0	249,61	0,94±0,02

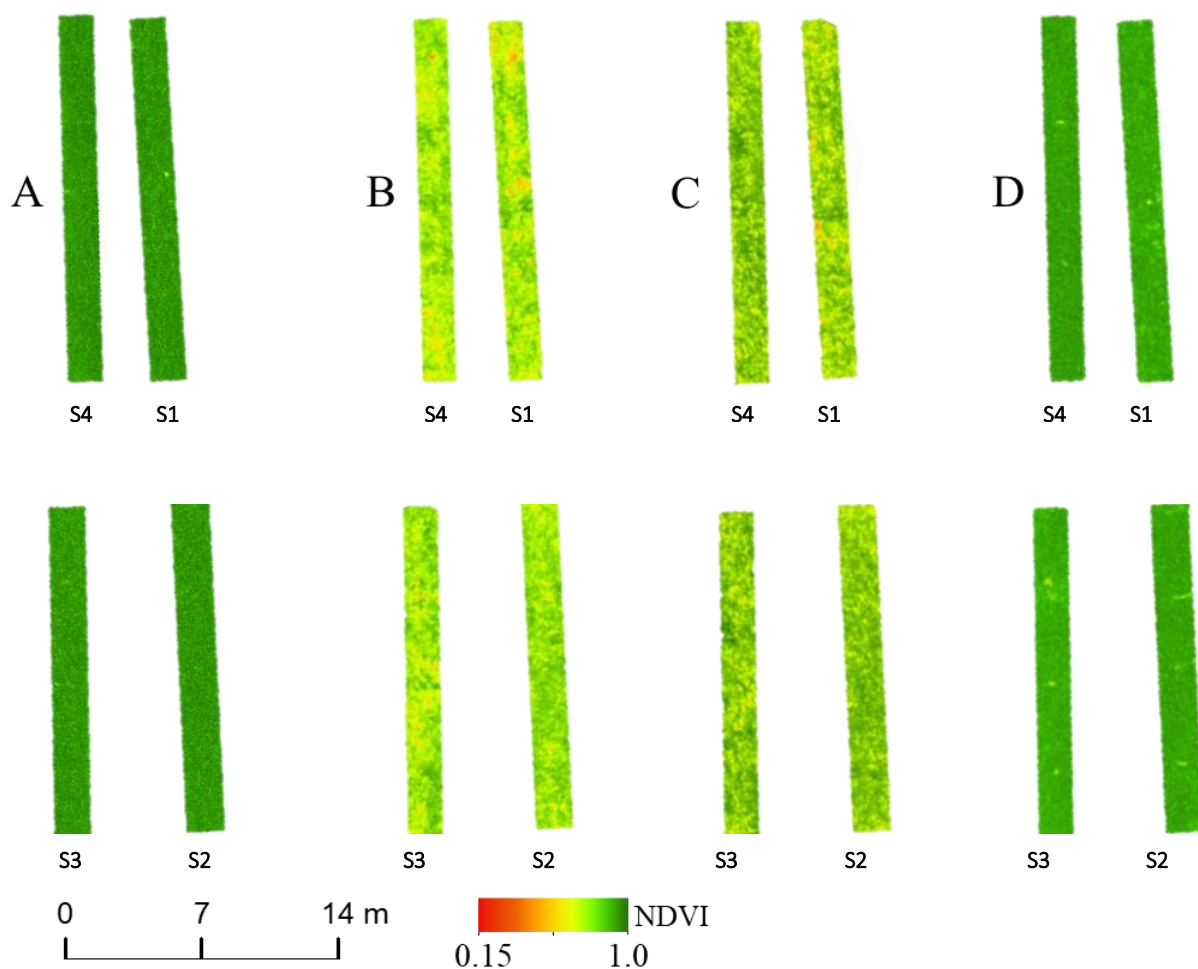


Figura 5. NDVI para os espaçamentos S1, S2, S3 e S4 em quatro datas diferentes, A (23/09/2020), B (25/09/2020, 1 DAC), C (30/09/2020, 6 DAC) e D (17/10/2020, 23 DAC) entre o final do sexto ciclo produtivo e todo o sétimo ciclo produtivo do capim Mombaça.

5.4. Conclusão

A irrigação por gotejamento subsuperficial em capim Mombaça promoveu um acúmulo de forragem maior que $200 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ em ciclo conduzido na primavera.

Ciclos de capim Mombaça conduzidos na primavera sob boas condições de temperatura, luminosidade e disponibilidade hídrica tendem períodos de descanso menores que 28 dias, considerando a altura de dossel de 0,90 m para início do pastejo.

Bons resultados quanto ao vigor vegetativo e à estruturação da pastagem podem ser obtidos utilizando espaçamentos entre tubos gotejadores maiores que 1,0 m na irrigação por gotejamento subsuperficial em capim Mombaça.

Referências

- ABIOYE, E. A.; ABIDIN, M. S. Z.; MAHMUD, M. S. A.; BUYAMIN, S.; ISHAK, M. H. I.; RAHMAN, M. K. I. A.; OTUOZE, A. O.; ONOTU, P.; RAMLI, M. S. A. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 173, 2020. 105441
- ALAM, M. S.; LAMB, D. W.; RAHMAN, M. M. A refined method for rapidly determining the relationship between canopy NDVI and the pasture evapotranspiration coefficient. *Computers and Electronics in Agriculture* 147, 2018.
- ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998.
- ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CUNHA, F. F. Comportamento do sistema radicular de capins manejados por pastejo submetidos a diferentes lâminas de irrigação. *Engenharia na Agricultura, Viçosa – MG*, v.18 n.5, 2010.
- ALEOTTI, J.; AMORETTI, M.; NICOLI, A.; CASELLI, S., 2018. A smart precision-agriculture platform for linear irrigation systems. In: 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). University of Split, FESB, pp. 1–6.
- ALFACE, A. B.; PEREIRA, S. B.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F. Sugarcane spatial-temporal monitoring and crop coefficient estimation through NDVI. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.23, n.5, p.330-335, 2019.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; de MORAES GONÇALVES, J.L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*,22(6), 711–728. 2013.
- BARRACHINA, M.; CRISTÓBAL, J.; TULLA, A. F. Estimating above-ground biomass on mountain meadows and pastures through remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 184–192, 2015.
- BIAN, J.; ZHANG, Z.; CHEN, J.; CHEN, H.; CUI, C.; LI, X.; CHEN, S.; FU, Q. Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial Vehicle. *Remote Sensing*. 2019, 11, 267; doi:10.3390/rs11030267.
- BIKOV, T.; MIHAYLOV, G. ILIEV, T.; STOYANOV, I. Drone Surveillance in the Modern Agriculture. In: 2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE). DOI: 10.1109/EEAE53789.2022.9831375
- CARNEVALLI, R. A.; SILVA, S. C.; BUENO, A. A. O.; UEBELE, M. C.; BUENO, F. O.; HODGSON, J.; SILVA, G. N.; MORAIS, J. P. G. Herbage production and grazing losses in *Panicum maximum* cv. Mombaça under four grazing managements. *Tropical Grasslands*, 40, 165 –176, 2006.
- CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; MELO, R. W.; SHIMABUKURO, Y. E.; FIOR, C. S. Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. *Ciência Florestal*, 27, 2017.
- ÇOLAK, Y. B.; YAZAR, A.; ÇOLAK, I.; AKÇA, H.; DURAKTEKIN, G. Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4, 2015.
- COSTA, J. O., COELHO, R. D., BARROS, T. H. S., FRAGA JUNIOR, E. F., FERNANDES, A. L. T. 2020. Canopy thermal response to water deficit of coffee plants under drip irrigation. *Irrigation and Drainage*, 69.

- GAO, F.; ANDERSON, M. C.; ZHANG, X.; YANG, Z.; ALFIERI, J. G.; KUSTAS, W. P.; MUELLER, R.; JHONSON, D. M.; PRUEGER, J. H. Toward mapping crop progress at field scales through fusion of Landsat and MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 188, 2017.
- HILL, M. J.; DONALD, G. E.; HYDER, M. W.; SMITH, R. C. G. Estimation of pasture growth rate in the south west of Western Australia from AVHRR NDVI and climate data. *Remote Sensing of Environment* 93, 2004.
- 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. Seasonality of biomass production of irrigated Mombaça 'Guinea grass'. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 2021, VOL. 71, n. 3, 156–164.
- LAMM, F. R.; CAMP, C. R. *Subsurface Drip Irrigation In: Microirrigation for Crop Production*, Elsevier, 2007.
- KANDELOUS, M. M.; SIMUNEK, J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 97, 1070 – 1076, 2010.
- MOTA, V. J. G.; CARVALHO, A. J.; OLIVEIRA, F. G.; GOMES, V. M.; MONÇÃO, F. P.; MOTA FILHO, V. J. V. Determinação do coeficiente de cultura do capim-mombaça manejado em diferentes estações do ano no semiárido mineiro. *Irriga, Botucatu*, v. 25, n. 1, p. 170-183, janeiro-março, 2020.
- OLIVEIRA, P. S.; HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; OLIVEIRA, W. C. M. Aplicações da agricultura de precisão em pastagens. *Circular Técnica 127*, Embrapa, Juiz de Fora, MG, 2023. ISSN 1678-037X
- PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; SILVA, S. C. Acúmulo de forragem durante a rebrotação de capim-xaraés submetido a três estratégias de desfolhação. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.38, n.4, p.618-625, 2009.
- PEREIRA, V. V.; FONSECA, D. M.; MARTUSCELLO, J. A.; BRAZ, T. G. S.; SANTOS, M. V.; CECON, P. R. Características morfológicas e estruturais de capim Mombaça em três densidades de cultivo adubado com nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.40, n.12, p.2681-2689, 2011.
- PETRIE, P. R., WANG, Y., LIU, S., LAM, S., WHITTY, M. A., SKEWES, M. A. The accuracy and utility of a low-cost thermal camera and smartphone-based system to assess grapevine water status. *Biosystems Engineering*, 179, 2019.
- PRUDENTE JUNIOR, A. C.; MENDONÇA, F. C.; SOUZA, D. P.; BRETAS, L. M.; AMORIM, D. M. Calibration of FDR probe in eutroferric red nitisol. In: *V Inovagri Meeting*. Fortaleza: [s.n.], 2019.
- RASMUSSEN, J.; NTAKOS, G.; NIELSEN, J.; SVENSGAARD, J.; POULSEN, R. N.; CHRISTENSEN, S. Are vegetation indices derived from consumer-grade câmeras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? *European Journal of Agronomy*, v. 74, p. 75-92, 2016.
- SANCHES, A. C.; SOUZA, D. P.; JESUS, F. L. F.; MENDONÇA, F. C.; GOMES, E. P. Crop coefficients of tropical forage crops, single cropped and overseeded with black oat and ryegrass. *Scientia Agricola*, v.76, n.6, p.448-458, 2019.
- SIMÕES, C. R.; ROSSIELLO, R. O. P.; GRACIOSA, M. G.; MACHADO, M. L.; SILVA, C. F. Imagens multiespectrais para avaliação de índice de área foliar e massa seca do capim 'Tifton 85', sob adubação nitrogenada. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.45, n.4, p.697-703, 2015.
- SINGH, J., GE, Y., HEEREN, D. M., WALTER-SHEA, E., NEALE, C. M., IRMAK, S., MAGUIRE, M. S. Inter-relationships between water depletion and temperature differential in row crop canopies in a sub-humid climate. *Agricultural Water Management*, 256, 2021.

- VALLE JÚNIOR, R. F. DO, SIQUEIRA, H. E., VALERA, C. A., OLIVEIRA, C. F., FERNANDES, L. F. S., MOURA, J. P., & PACHECO, F. A. L. Diagnosis of degraded pastures using an improved NDVI-based remote sensing approach: An application to the Environmental Protection Area of Uberaba River Basin (Minas Gerais, Brazil). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 14, p. 20-33, 2019.
- VICIEDO, D. O.; PRADO, R. M.; MARTÍNEZ, C. A.; HABERMANN, E.; PICCOLO, M. C. Short-term warming and water stress affect *Panicum maximum* Jacq. stoichiometric homeostasis and biomass production. *Science of the Total Environment*, 681, p. 267 – 274, 2019.
- YAMORI, W.; HOKOSAKA, K.; WAY, A. D. Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis Research*, 119, p. 101 – 117, 2014.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Capim Mombaça irrigado por gotejamento subsuperficial, com tubos gotejadores instalados a 0,20 de profundidade, alcança bons resultados produtivos em Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico, ao se utilizar espaçamentos entre tubos gotejadores superiores a 1,0 m, o que pode reduzir custos de projeto. Ainda com base nos resultados desse estudo, reforça-se a recomendação de manejar a pastagem com base na altura de dossel e não em dias fixos de manejo.

6.1. Sugestões para estudos futuros

Sugere-se que sejam desenvolvidos mais estudos envolvendo a definição de espaçamento e profundidade de instalação de tubos gotejadores em pastagens irrigadas por gotejamento subsuperficial, inclusive envolvendo a presença animal. É oportuno também desenvolver estudos que abordem a viabilidade econômica para projetos de pastagens irrigadas por gotejamento subsuperficial, bem como estudos que explorem a geração de dados e informações a partir do uso de tecnologias da Agricultura 4.0 no cultivo e manejo de pastagens.