Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Utilização de sonda capacitiva FDR para estimativa do consumo de água e coeficiente de cultura de *Urochloa brizantha* cv Marandu em cultivo solteiro e consorciado

Amauri Cassio Prudente Junior

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

Amauri Cassio Prudente Júnior
Engenheiro Agrônomo

Utilização de sonda capacitiva FDR para estimativa do consumo de água e coeficiente de cultura (Kc) de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em cultivo solteiro e consorciado

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **FERNANDO CAMPOS MENDONÇA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba

2019

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

Prudente Junior, Amauri Cassio

Utilização de sonda capacitiva FDR para estimativa do consumo de água e coeficiente de cultura (Kc) de *Urochloa brizantha* cv Marandu em cultivo solteiro e consorciado / Amauri Cassio Prudente Junior..- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

109 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Técnica de capacitância 2. Evapotranspiração de cultura 3. Sobressemeadura 4. Atividade radicular 5. Lisimetria de pesagem I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Amauri e Silvana pelo amor incondicional e ajuda durante esta jornada.

Aos meus queridos amigos que ajudaram a concretizar este objetivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado força e saúde para concluir essa fase da vida.

Agradeço à Universidade de São Paulo, bem como ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela acolhida e por toda estrutura que credenciou a realização deste trabalho.

Agradeço à CAPES pela bolsa concedida durante uma fase do Mestrado.

Agradeço aos meus pais, Amauri e Silvana, por terem ajudado e incentivado sempre quando foi necessário.

Agradeço em especial ao Prof. Dr. Fernando Campos Mendonça pela orientação e amizade nesse período. Também aos professores Sergio Duarte Nascimento e Sônia Maria De Stefano Piedade, que auxiliaram na construção deste trabalho.

Agradeço aos colegas da pós-graduação, em especial a Danielle Morais Amorim, Débora Pantojo de Souza e Elizabeth Lima Carnevskis, pela fundamental ajuda na realização deste experimento.

Agradeço aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, Antônio, Áureo, José Geraldo, Gilmar e Luiz, pela enorme contribuição durante a fase experimental, e pela amizade.

BIOGRAFIA

Amauri Cassio Prudente Junior nasceu no município de Bauru-SP no dia 25 de fevereiro de 1993, filho de Amauri Cassio Prudente e Silvana Postigo Prudente. Cursou ensino fundamental no colégio São Francisco de Assis, em Bauru-SP, e o ensino médio no colégio SETA, na mesma cidade. No ano de 2011 ingressou no curso de Agronomia pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" campus de Ilha Solteira-SP, concluindo o mesmo em janeiro de 2017. Durante a Graduação, realizou Graduação *sandwich* na Espanha pelo programa "Ciências sem fronteiras" por meio da qual passou a estudar na Universidad de Córdoba. Em março de 2017 iniciou o curso de Mestrado no programa de Pós-Graduação de Engenharia de Sistemas Agrícolas da ESALQ/USP, onde está até o presente momento, submetendo-se à defesa da Dissertação para obtenção do título de Mestre em Ciências.

EPÍGRAFE

“Pensamos demasiadamente e
sentimos muito pouco.
Necessitamos mais de humildade que de máquinas.
Mais de bondade e ternura que de inteligência.
Sem isso, a vida se tornará violenta e tudo
Se perderá.”

Charles Chaplin

SUMÁRIO

RESUMO 9
ABSTRACT 10
LISTA DE FIGURAS 11
LISTA DE TABELAS 14
1. INTRODUÇÃO 17
1.1 HIPÓTESE 19
2. OBJETIVOS 21
2.1. Geral 21
2.2. Específicos 21
3.1 *Urochloa brizantha* (Höchst. ex A. Rich) R.Webster 23
3.2 Sobressemeadura com culturas de inverno 24
3.3 Irrigação de pastagens no Brasil 25
3.4 Consumo hídrico e evapotranspiração de cultura 26
3.5 Métodos de determinação de umidade do solo 27
3.6 Utilização de sensores no monitoramento da umidade do solo 28
3.7 Técnica capacitiva 28
3.8 Desenvolvimento Radicular 32
3.9 Coeficiente de cultura (Kc) 34
4. MATERIAL E MÉTODOS 37
4.1 Caracterização local 37
4.2 Caracterização física do solo 39
4.2.1. Caracterização química do solo 39
4.2.2.Densidade, porosidade, condutividade hidráulica e granulometria 40
4.2.3. Curva característica de retenção de água no solo 44
4.3. Delineamento experimental 46
4.4. Sistema de Irrigação 47
4.5. Sonda Capacitiva (FDR) 48
4.6. Evapotranspiração de cultura por meio da sonda FDR 53
4.7. Avaliação da profundidade efetiva do sistema radicular. 56
4.8. Determinação de ETc por lisimetria de pesagem 58
4.9. Evapotranspiração de referência (ETo) e coeficiente de cultura (Kc) 61
4.10. Parâmetros fitotécnicos e produtivos 62
4.11. Parâmetros Estatísticos 63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 65
5.1. Calibração da sonda FDR 65

5.2. ETc e Kc determinado por lisimetria de pesagem e sonda FDR para o capim Marandu solteiro no período de primavera e verão. 70

5.3. ETc e Kc determinados por lisimetria de pesagem e sonda FDR para o capim Marandu sobressemeado com forrageiras de inverno 73

5.4. Correlações de ETc e Kc entre Sonda FDR e Lisímetro de Pesagem 79

5.5. Profundidade efetiva e atividade de raízes 83

5.6. Parâmetros produtivos e produtividade de água do capim Marandu solteiro. 89

5.7. Parâmetros produtivos e produtividade de água do capim Marandu consorciado..... 91

6. CONCLUSÃO 95

REFERÊNCIAS 97

RESUMO

Utilização de sonda capacitiva FDR para estimativa do consumo de água e coeficiente de cultura (Kc) de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em cultivo solteiro e consorciado

A demanda de alimentos para 2050 está prevista ser o dobro da atual. A produção de alimentos no Brasil tem significativa relevância para a segurança alimentar mundial, sendo a pecuária de suma importância devido à grande demanda mundial de carne e leite provenientes do Brasil. Assim, surge a necessidade de estudos que visem aumentar a produção sem expandir área de plantio, sendo a irrigação uma das formas de intensificar a produtividade de sistemas agrícolas. Para um manejo da irrigação adequado é necessário o conhecimento da evapotranspiração da cultura (ETc), e estudos de técnicas que façam essa estimativa com precisão, de forma prática e acessível, são de grande valia para uma agricultura irrigada sustentável. Uma dessas técnicas é a reflectometria no domínio da frequência (FDR), que se destaca por sua praticidade e capacidade de medir a umidade do solo em camadas distintas. Por ser um equipamento portátil, sua utilização pode resultar em menos custo para estimativas de coeficientes de cultura, substituindo a lisimetria (método padrão). Portanto, o objetivo deste trabalho foi verificar a possibilidade da utilização de uma sonda (FDR) como instrumento auxiliar na estimativa de consumo hídrico e de coeficientes de cultura (Kc) do capim Marandu, em cultivo solteiro (primavera/verão) e consorciado com aveia preta + azevém ou centeio + azevém no período de outono/inverno. Como objetivos secundários, buscou-se: (i) estimar o consumo hídrico e os coeficientes de cultura dos dosséis forrageiros estudados com a sonda FDR devidamente calibrada ao solo local; (ii) comparar o consumo de água e os valores de Kc obtidos por meio da sonda FDR e por lisimetria de pesagem; (iii) verificar se a técnica capacitiva é capaz de identificar a atividade de absorção de água do sistema radicular das forrageiras estudadas; e (iv) analisar parâmetros produtivos do capim Marandu solteiro e consorciado, e estimar a produtividade de água da cultura. O experimento foi realizado na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), em Piracicaba-SP. O período experimental foi de 21/09/2017 a 24/09/2018, com ciclos de corte de duração variada, baseados na fenologia das culturas. Os resultados obtidos revelaram que a técnica de capacitância com sonda FDR mostrou-se apropriada para a estimativa de ETc e Kc de dosséis forrageiros em cultivo solteiro e consorciado, com valores próximos ao método padrão (lisimetria de pesagem). O uso da sonda capacitiva também foi eficaz na identificação da atividade de absorção de água pelas raízes, por meio do monitoramento da umidade do solo. A sobressemeadura com culturas de inverno foi uma opção resiliente para o período de estacionalidade, durante o qual aumentou o potencial produtivo do dossel forrageiro. O consórcio Marandu + aveia preta + azevém apresentou maior produtividade que Marandu + centeio + azevém.

Palavras-chave: Técnica de capacitância; Evapotranspiração de cultura; Sobressemadura; Atividade radicular; Lisimetria de pesagem

ABSTRACT

Utilization of capacitive probe FDR to estimate water consumption and crop coefficient (kc) of *Urochloa brizantha cv.* Marandu single and intercropping

The demand for food by 2050 is expected to be the double of the current year. The food production in Brazil has significant relevance for the world food security, and pasture crops are very important due to the great world demand for meat and milk come from Brazil. Thus, there is a need for studies that aim to increase forage production without expanding tillage area, and irrigation is one way to increase the productivity of agricultural systems. Adequate irrigation management requires knowledge of crop evapotranspiration (ETc), and studies of techniques to accurately estimate it, in a practical and accessible way, having a great value for a sustainable irrigated agriculture. One of these techniques is frequency domain reflectometry (FDR), which stands out for being practical and able to measure soil moisture in different layers. Because it is a portable equipment, its use can result in lower costs for estimating crop coefficients, replacing lysimetry (standard method). Therefore, this work aimed at verifying the possibility to use a FDR probe as a tool for estimating the crop water consumption and crop coefficients (Kc) of ‘Marandu’ palisade grass, single cropped (spring / summer) and intercropped with black oat + ryegrass and with rye + ryegrass during the fall / winter period. As secondary objectives, we sought to: (i) estimate the crop water consumption and crop coefficients of the forage canopies with the FDR probe properly calibrated to the local soil; (ii) compare the crop water consumption and Kc values estimated by the FDR probe and those ones determined by weighing lysimetry; (iii) verify if the capacitive technique is able to identify the water absorption activity of the root system; (iv) to analyze productive parameters of single and intercropped ‘Marandu’ palisade grass, and to estimate the water productivity of the forage canopies. The experiment was carried out at an experimental area of "Luiz de Queiroz" College of Agriculture (ESALQ / USP), at Piracicaba-SP. The experimental period was from 09/21/2017 to 09/24/2018, with grow-and-cut cycles whose duration based on the phenology of the crops. The results revealed that FDR capacitance technique was adequate for ETc and Kc estimates of both, single cropped and intercropped forage canopies, with values near to the standard method (weighing lysimetry). The use of the capacitive probe was also effective in identifying the water absorption activity of the root system, through the monitoring of soil moisture. Overseeding with winter forage crops was a resilient option for the seasonality period, increasing the productive potential of the forage canopy. Intercropped ‘Marandu’ + black oat + rye consortium presented higher forage yield than ‘Marandu’ + rye + ryegrass consortium.

Keywords: Capacitive technique; Crop evapotranspiration; Overseeding; Root activity; Weighing lysimetry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Croqui da área experimental, ESALQ/USP, Piracicaba/SP, 2018.....38

Figura 2:Valores de precipitação (mm), umidade relativa (URmed, %), temperatura mínima (Tmin, ºC) e temperatura média (Tmed, ºC) durante o período experimental 09/2017 a 09/2018. Piracicaba: Pac= precipitação acumulada no período; Iac = irrigação acumulada média.....39

Figura 3: Curva de retenção de água no solo conforme modelo de van Genutchen (1980) para 9 camadas avaliadas em Nitossolo Vermelho eutroférrico latossólico, Piracicaba-SP, 2018..45

Figura 4**:** Componentes da sonda Diviner 2000. A - Unidade de controle (*display* e datalogger). B - Painel de conexões (Parte traseira da unidade de controle). C – Sonda, haste e cabo de conexão. Piracicaba/SP. Fonte Sanches (2016).....49

Figura 5: Esquema da sonda Diviner com tubo de acesso instalado para medições até 90 cm de profundidade. Piracicaba/SP, 2018.....50

Figura 6: Representação esquemática dos níveis de umidade utilizados para retirada de amostras indeformadas utilizadas na calibração da sonda FDR. A - solo em condição seca. B - solo em umidade intermediária. C - solo em umidade alta.....51

Figura 7: a) Instalação do tubo para posterior leitura da sonda FDR. b) Escavação com retroescavadeira para abrir a trincheira. c) Retirada manual de solo com picareta para coletar amostras em diferentes profundidades. d) e e) Coleta de solo por meio de três. 52

Figura 8: Etapas para obtenção da massa da matéria fresca e seca do sistema radicular do capim Marandu solteiro e consorciado, Piracicaba-SP, 2018. 58

Figura 9: Corte transversal de um lisímetro de pesagem. Piracicaba/SP, 2017/18. 59

Figura 10: Sistema de pesagem e drenagem, registrado por Sanches (2017), Piracicaba-SP..60

Figura 11: Umidade volumétrica em três condições de umidade (alta, intermediária e baixa) em um Nitossolo Vermelho eutroférrico latossólico, em Piracicaba-SP, 2018. 65

Figura 12: Escala de frequência em três condições de umidade (saturada, úmida e seca) no Nitossolo Vermelho eutroférrico latossólico, em Piracicaba-SP, 2018.....66

Figura 13: Densidade do solo (g/cm^{-3}) do Nitossolo Vermelho eutroférrico latossólico, em Piracicaba-SP, 2018.....67

Figura 14: Gráficos de dispersão por camada, Piracicaba/SP, 2018. 68

Figura 15: Grafico de dispersão de todo perfil do solo (0-0,9 m), Piracicaba/SP, 2018.....69

Figura 16: Valores médios de ETc e ETo (mm dia^{-1}) para o capim Marandu em cultivo solteiro, nos ciclos ocorrido durante o período primavera/verão, Piracicaba/SP, 2018. Legenda: ETc Div $_{acum}$ = evapotranspiração de cultura estimada com auxílio da sonda Diviner acumulada no ciclo, ETc Lis $_{acum}$ = evapotranspiração de cultura estimada com lisimetro de pesagem acumulada no ciclo, ETo $_{acum}$ = evapotranspiração de referência acumulada no ciclo. 71

Figura 17: Valores de Kc estimados a cada ciclo para o capim Marandu solteiro, no período primavera/verão, Piracicaba/SP, 2018. Kc Div $_{médio}$ = coeficiente de cultura médio estimado pela sonda Diviner no ciclo, Kc Lis $_{médio}$ = coeficiente de cultura médio estimado por lisimetria. 72

Figura 18: Valores médios de ETc e ETo (mm dia^{-1}) para o capim Marandu sobressemeado com aveia preta + azevém, nos ciclos ocorridos durante o período outono/inverno, Piracicaba/SP, 2018. Legenda: ETc Div$_{acum}$ = evapotranspiração de cultura estimada com auxílio da sonda Diviner, ETc Lis$_{acum}$ = evapotranspiração de cultura estimada por lisimetria de pesagem e ETo$_{acum}$ = evapotranspiração de referência acumulada no ciclo. 74

Figura 19: Valores de Kc estimados a cada ciclo para o capim Marandu sobressemeado com aveia preta + azevém, no período outono/inverno, Piracicaba/SP, 2018. Kc Div$_{médio}$ = coeficiente de cultura médio estimado pela sonda Diviner no ciclo, Kc Lis$_{médio}$ = coeficiente de cultura estimado por lisimetria de pesagem a cada ciclo. 75

Figura 20: Valores de ETc e ETo para o capim Marandu sobressemeado com centeio + azevém, no período outono/inverno, Piracicaba/SP, 2018. Legenda: ETc Div$_{acum}$ = Evapotranspiração de cultura estimada pela sonda Diviner acumulada no ciclo, ETc Lis$_{acum}$ = Evapotranspiração de cultura estimada por Lisimetria acumulada no ciclo e ETo$_{acum}$ = evapotranspiração de referência acumulada no ciclo..... 77

Figura 21: Valores de Kc para o capim Marandu sobressemeado com centeio + azevém, no período outono/inverno, Piracicaba/SP, 2018. Kc Div $_{médio}$ = coeficiente de cultura médio estimado pela sonda Diviner no ciclo, Kc Lis $_{médio}$ = coeficiente de cultura médio estimado por lisimetria no ciclo. 78

Figura 22: Gráficos de dispersão para comparação da ETc estimada pela sonda FDR e pelo lisimetro de pesagem em diferentes cultivos. Piracicaba/SP, 2018. 79

Figura 23: Gráficos de dispersão para comparação de Kc estimado pela sonda FDR e pelo lisimetro de pesagem em diferentes cultivos. Piracicaba/SP, 2018. 81

Figura 24: Variação da umidade do solo ($\Delta\theta$,%) em porcentagem da CAD (mm cm^{-1}) para as camadas de solo 0-0,2 m, 0,2-0,4 m, 0,4-0,6 m e 0,6-0,9 m, em capim Marandu solteiro, Piracicaba/SP, 2018. 85

Figura 25: Variação da umidade do solo ($\Delta\theta$,%) em porcentagem da CAD (mm cm^{-1}) para as camadas de solo 0-0,2 m, 0,2-0,4 m, 0,4-0,6 m e 0,6-0,9 m, em capim Marandu consorciado com aveia preta e azevém, Piracicaba/SP, 2018. 86

Figura 26:Variação da umidade do solo (Δθ,%) em porcentagem da CAD (mm cm^{-1}) para as camadas de solo 0-0,2 m, 0,2-0,4 m, 0,4-0,6 m e 0,6-0,9 m, em capim Marandu consorciado com centeio e azevém, Piracicaba/SP, 2018.....86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise química do solo da área experimental de acordo com a camada de solo de 0-20 cm e 20-40 cm. Piracicaba/SP, 2017.....40

Tabela 2: Caracterização inicial do solo da área experimental quanto à microporosidade (Micro, cm^3 cm^{-3}), macroporosidade (Macro, cm^3 cm^{-3}), porosidade total (PT, cm^3 cm^{-3}), densidade do solo (Ds, g cm^{-3}) e condutividade hidráulica (cm h^{-1}). Piracicaba-SP, 2019. 42

Tabela 3:Caracterização inicial do solo da área experimental quanto à composição granulométrica (%), Piracicaba-SP 2019. 43

Tabela 4: Umidade volumétrica em função do potencial matricial e da profundidade de amostragem. Piracicaba/SP, 2017. 45

Tabela 5: Datas e períodos de corte do capim Marandu exclusivo e sobressemeado, realizados durante o período experimental. Piracicaba/SP, 2017-2018. 46

Tabela 6: Profundidade efetiva do sistema radicular considerada no balanço volumétrico em cada ciclo produtivo. 53

Tabela 7: Períodos de coleta do sistema radicular do capim Marandu exclusivo e consorciado. Piracicaba - SP. 2018. 57

Tabela 8: Equações de calibração e umidades mínimas e máximas por camada e para todo o perfil do solo (0-0,9 m). 68

Tabela 9: Valores dos componentes do balanço hídrico durante o ciclo 2, Piracicaba/SP, 2018.....71

Tabela 10: Índices estatísticos para comparação da ETc estimada pela sonda FDR e pelo lisímetro de pesagem. Piracicaba/SP, 2018. 79

Tabela 11: Índices estatísticos demonstrados para Kc estimado com sonda FDR e com lisímetro de pesagem. Piracicaba/SP, 2018.....81

Tabela 12: Porcentagem do sistema radicular em relação à época do ano para capim Marandu em cultivo solteiro. Piracicaba/SP, 2018. 83

Tabela 13: Porcentagem do sistema radicular em relação à época do ano para capim Marandu em cultivos consorciados. Piracicaba/SP, 2018..... 83
Tabela 14: Porcentagem do sistema radicular, porcentagem da extração de água e razão entre porcentagem da extração de água e porcentagem do sistema radicular, em relação à época do ano para capim Marandu solteiro. Piracicaba/SP, 2018. 88

Tabela 15: Porcentagem do sistema radicular, porcentagem da extração de água e razão entre porcentagem da extração de água e porcentagem do sistema radicular, em relação à época do ano para capim Marandu consorciado. Piracicaba/SP, 2018..... 88

Tabela 16: Dados médios por ciclo de produtividade total de forragem, produção de material morto, altura do dossel forrageiro, índice de área foliar e produtividade de água de capim Marandu em cultivo solteiro. Piracicaba/SP, 2017/2018. 90

Tabela 17: Dados médios de produtividade total de forragem (PTF), produção de material morto (PMM), altura do dossel forrageiro (ADF), índice de área foliar (IAF) e produtividade de água (PA) para capim Marandu consorciado com aveia e azevém (MAA) e com centeio . 92

Tabela 18: Dados médios da produção de forragem de capim Marandu e das forrageiras de inverno em cada consórcio, por ciclo de cultivo. Piracicaba/SP, 2017/2018..... 92

1. INTRODUÇÃO

Atualmente há uma crescente demanda por alimentos de origem animal, sendo parte deles produzidos com alimentação à base de forragem. Segundo Tilman *et al*. (2011), a previsão para 2050 é que a população mundial necessite do dobro de alimentos consumidos atualmente, sendo de suma importância desenvolver ou melhorar técnicas que visam ao aumento da produtividade sem expansão de áreas cultivadas.

Na pecuária, o uso sustentável das áreas sob pastagens tem alta relevância, pois boa parte das pastagens cultivadas no Brasil encontra-se em algum nível de degradação e apresenta menos de 50% de seu potencial produtivo em relação às condições edafoclimáticas locais.

A irrigação é uma técnica utilizada para obter alta produção de forragem em sistemas intensivos de produção animal e reduzir a irregularidade na produção no período seco do ano. Todavia, em grande parte das regiões de clima tropical, o inverno apresenta redução na precipitação, temperatura e luminosidade. Assim, há redução da produtividade das forrageiras tropicais, independentemente da disponibilidade hídrica no solo. Nestas condições, a sobressemeadura de forrageiras de inverno em pastagens com forrageiras tropicais é uma alternativa para contornar o problema da estacionalidade de produção de forragem, fazendo jus ao investimento em um sistema de irrigação.

A sobressemadura consiste em semear espécies forrageiras anuais de estação fria em uma área de pastagem estabelecida com forrageira tropical. O êxito desse tipo de consórcio depende da interação entre as culturas no que tange a consumo hídrico, nutricional e exploração de espaço para captar luminosidade.

A agropecuária irrigada nacional ainda é incipiente, devido à falta de informações a respeito dos benefícios provenientes da irrigação, a tramites burocráticos como outorga para uso de água, e ao baixo grau de conhecimento sobre técnicas de manejo que justificariam a aquisição do sistema de irrigação. Portanto, estudos que visam facilitar o manejo da irrigação são um atrativo ao produtor e, além disso, podem gerar impacto positivo a uma atividade agrícola sustentável.

Nesse sentido, o objetivo do manejo da irrigação é orientar a distribuição da lâmina de água necessária à planta para atingir a maior produtividade potencial ou econômica. Um bom manejo da irrigação deve ser feito de maneira correta e prática, e necessita da determinação da demanda hídrica de uma cultura, denominada evapotranspiração (ETc), que consiste na soma da evaporação do solo e da transpiração da cultura. Tal determinação pode ser feita a partir de

estimativas, utilizando elementos micrometeorológicos e ajustes de coeficientes de cultivo (Kc), que se alteram conforme o desenvolvimento fenológico da planta.

A evapotranspiração de uma cultura (ETc) ou de um consórcio de culturas pode ser medida ou estimada. A medição da ETc pode ser feita por meio de um lisímetro de pesagem, que consiste em um bloco de solo com volume conhecido e isolado do restante do solo circundante por paredes, instalado no centro de uma área cultivada. O conteúdo do lisímetro (solo + plantas + água) é pesado frequentemente por meio de células de carga. As diferenças de peso são utilizadas para determinar a quantidade de água consumida em pequenos intervalos de tempo. Apesar de sua exatidão, esta técnica é extremamente onerosa e trabalhosa, desde a instalação até sua manutenção, sendo uma alternativa inviável para o manejo da irrigação por parte dos produtores rurais. Mesmo em áreas de pesquisa experimental, a lisimetria de pesagem é limitada por necessitar de ao menos de um lisímetro por cultivo estudado.

Nesse sentido, métodos e técnicas alternativos para estimar o consumo hídrico de uma cultura são opções que despertam interesse cientifico, pois podem ter exatidão e precisão próximas às do método direto, serem mais práticas e acessíveis a pesquisadores e produtores rurais. Uma alternativa são métodos que estimam ETc por meio do balanço hídrico sem a necessidade de confinar um bloco de solo, como nos lisímetros. Tais métodos estimam todas as entradas (precipitação, irrigação, ascensão capilar, escoamento superficial) e saídas de água (evapotranspiração, drenagem profunda, escoamento superficial) de um sistema de produção agrícola, e podem determinar a situação hídrica das culturas implantadas no local.

Dois elementos que integram na exatidão e a precisão no balanço hídrico, e que necessitam ser estimados, são a umidade atual do solo e a profundidade efetiva do sistema radicular, considerada como aquela em que estão 90% das raízes de uma cultura. O conhecimento da profundidade de raízes é necessário para calcular a lâmina de irrigação necessária para abastecer a planta de modo adequado, sem desperdícios.

Estudos sobre determinação de umidade do solo vêm sendo desenvolvidos, reduzindo a perturbação no ambiente para que a medição não seja afetada pelo procedimento adotado. Sondas capacitivas são alternativas neste sentido, pois correlacionam medidas de reflectância de ondas eletromagnéticas ao conteúdo de água do solo. Tais sondas são alternativas menos destrutivas que o método padrão de determinação de umidade (gravimétrico), e suas leituras podem ser repetidas no mesmo local, em diferentes profundidades e com rapidez, gerando praticidade na coleta de dados. Os métodos mais utilizados são a reflectância no domínio temporal (TDR) e a reflectância no domínio de frequência (FDR), cujas sondas são utilizadas tanto no ramo científico quanto em propriedades rurais.

A sonda FDR, no entanto, apresenta vantagens em relação à sonda TDR, tais como a facilidade de instalação e de aquisição de dados, o que justifica o interesse de estudos com esse tipo de sonda. Especificamente, citam-se estudos sobre precisão e exatidão na medição da umidade do solo e da atividade radicular na absorção de água. Tais medidas são componentes importantes para estimar a ETc e o Kc em dosséis forrageiros em cultivo solteiro ou consorciado.

1.1 HIPÓTESE

A hipótese central deste trabalho é a de que é possível fazer estimativa do consumo hídrico e de coeficientes de cultivo de um dossel forrageiro com a técnica capacitiva FDR.

A hipótese secundária é que a sonda FDR também pode ser um instrumento de verificação da absorção de água pelo sistema radicular no perfil do solo e contribuir para melhorar o manejo da irrigação por meio da determinação da profundidade de raízes.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Utilizar sonda FDR como instrumento auxiliar na estimativa de coeficientes de cultura, a cultura de *Urochloa brizantha* cv. Marandu (Syn. *Brachiaria brizantha* cv. Marandu) em sistema de cultivo solteiro e consorciado.

2.2. Específicos

a. Calibrar e operacionalizar uma sonda FDR para monitorar a umidade do solo.

b. Determinar o consumo de água da forrageira tropical estudada em cultivo solteiro e consorciado com a sonda FDR.

c. Estimar os valores de Kc de dosséis forrageiros compostos por uma forrageira tropical em cultivo solteiro, durante primavera e verão, e consorciado com dois conjuntos de duas forrageiras de inverno (aveia + azevém ou centeio + azevém), ao longo de seus ciclos de crescimento.

d. Comparar o consumo de água medido por meio da sonda FDR com o consumo medido com lisímetros de pesagem.

e. Verificar se a sonda FDR é capaz de identificar atividade de absorção de água do sistema radicular das forrageiras estudadas.

f. Estimar a produtividade de água, parâmetros produtivos (produção de forragem, altura do dossel forrageiro e índice de área foliar) do capim Marandu em cultivo solteiro e consorciado com aveia preta + azevém e centeio + azevém no período do inverno.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Urochloa brizantha* (Höchst. ex A. Rich) R.Webster

A Urochloa brizantha cv. Marandu (Syn Brachiaria brizantha cv Marandu) foi lançada pela Embrapa em 1984. Apresenta boa produtividade e qualidade da forragem, rápido estabelecimento, resistência a cigarrinhas das pastagens, boa cobertura de solos e capacidade de competição com invasoras (EMBRAPA, 2007). Por isso, é a forrageira mais comercializada no Brasil, representando 90% do volume de sementes comercializadas no país (BISCOLA; PEREIRA; COSTA, 2013).

É uma espécie da família Poaceae, possui hábito de crescimento cespitoso ereto a semi-ereto, pouco enraizamento dos nós em contato com o solo e folhas cobertas por pelos na face ventral (BOTREL; NOVAES; ALVIM, 1998). Seu sistema radicular é vigoroso e profundo, o que favorece a tolerância ao déficit hídrico e permite maior absorção de nutrientes nas camadas mais profundas do solo. Por isso, é produtiva em regiões com deficiência hídrica, em relação à outras gramíneas e produtoras de grãos (BARDUCCI *et al*., 2009).

É bem aceita pelos ruminantes e, ao contrário de outras espécies do mesmo gênero, também é aceita por equinos. É adaptada a solos de média fertilidade, mas muito produtiva quando bem suprida de água e adubação, podendo produzir até 36 Mg MS ha^{-1} ano^{-1} (VALLE *et al*., 2011).

Tal como várias outras forrageiras tropicais, sua fenologia é caracterizada em dois períodos: vegetativo e reprodutivo. Para a maioria dos produtores rurais, o interesse principal é o desenvolvimento na fase vegetativa, pois na fase reprodutiva há menor taxa de crescimento e queda da qualidade da forragem (PEDREIRA; TONATO; LARA, 2009).

Sua altura de corte pode variar de 15 a 45 cm em sistema de lotação contínua para obtenção de maior ingestão por parte dos bovinos durante o período de águas (PAULA *et al*., 2012).

O clima também influencia no crescimento do capim Marandu, sendo possível notar diferenças no perfilhamento do capim durante as estações do ano, o que justifica um manejo de altura de corte ou pastejo diferenciado por estação (COSTA *et al.*, 2016).

3.2 Sobressemeadura com culturas de inverno

Nas localidades em que há estacionalidade, pode-se fazer uso da sobressemeadura de espécies forrageiras de inverno em pastagens de *Urochloa brizantha*, visando reduzir os efeitos na produção de forragem e os custos de suplementação com volumosos conservados e concentrados. Assim, pode-se maximizar o tempo de utilização das pastagens, reduzir a área destinada à produção de forragens conservadas e a necessidade de mão-de-obra na propriedade, e maximizar a utilização de equipamentos de irrigação (BERTOLOTE, 2009).

A sobressemeadura melhora o desempenho produtivo da pastagem no período de outono/inverno e justifica o uso da irrigação. Devido à estacionalidade de produção das forrageiras tropicais, em muitos casos não há retorno econômico da irrigação nesse período e o equipamento ficaria ocioso.

Há várias espécies forrageiras que podem ser utilizadas na sobressemeadura de outono/inverno para reduzir o déficit alimentar nessa época do ano. Dentre elas, a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) e o azevém (*Lolium multiflorium*) vêm sendo utilizados em larga escala nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, permitindo a obtenção de forragem de alta qualidade durante o inverno (GERDES, 2005). Outra espécie utilizável é o centeio (*Secale cereale*), que se destaca pelo crescimento inicial vigoroso, pela rusticidade e pela resistência ao frio, à seca e à acidez do solo (BAIER, 1994). O uso de aveia preta, azevém e centeio pode ser interessante na sobressemeadura.

A produção individual de forragem de cada espécie citada é concentrada em diferentes períodos: centeio entre maio e junho (55%), aveia preta entre junho e julho (60%) e azevém entre agosto e setembro (70%) (POSTIGLIONI, 1982). Portanto, é interessante haver estudos sobre o consórcio de tais espécies.

Em dois estudos sobre o consórcio entre espécies forrageiras tropicais e de inverno, a aveia preta e o azevém representaram aproximadamente 50% da produção total de forragem em dois anos de época seca (2,4 e 3,5 Mg MS ha^{-1} de produção total do consórcio). (OLIVEIRA *et a*l., 2005; OLIVEIRA, 2007).

O capim Marandu é uma espécie mais adaptada à sobressemeadura, comparado a outras importantes espécies forrageiras como o capim Mombaça, o que é um atrativo do ponto de vista econômico. Provavelmente, os resultados em capim Marandu são melhores devido ao seu menor porte, que permite maior entrada de radiação solar no solo.

Fontaneli *et al*. (2005) avaliaram a sobressemeadura com azevém e centeio em capim Tifton-85 e constataram uma lotação média de 3,75 vacas ha^{-1} dia^{-1}. Tal valor é superior ao

observado por Paris *et al*. (2009), que obtiveram 3,45 vacas ha^{-1} dia^{-1} em pastagem de capim Coastcross-1 (*Cynodon dactylon* (L). Pers) consorciada com *Arachis pintoi*.

Sanches *et al.* (2015) estudaram a sobressemeadura de três cultivares de aveia preta em pastagem de capim Tifton-85, sem e com irrigação. Os autores constataram que a irrigação aumentou a taxa de acúmulo de forragem diária, que foi de 40,6 e 74,2 kg MS ha^{-1} dia^{-1} nas parcelas sem e com irrigação, respectivamente. Também constataram que a qualidade da forragem (digestibilidade) foi maior nas parcelas com sobressemeadura que no cultivo exclusivo de capim Tifton-85.

3.3 Irrigação de pastagens no Brasil

O Brasil é o segundo maior produtor, e maior exportador de carne mundial (USDA, 2018), além de ser o sexto maior produtor de leite (DIAS-FILHO, 2014). A grande maioria dos rebanhos de corte e leite utilizam as pastagens para alimentação (DIAS-FILHO, 2014). Segundo Tilman *et al*. (2011), o aumento da renda de países em desenvolvimento levará à tendência de duplicação da demanda mundial de alimentos até 2050. Há duas opções viáveis para atender tal demanda: expandir áreas de plantio ou aumentar a produtividade das áreas cultivadas atualmente.

Os avanços tecnológicos visando aumento de produtividade estão presentes na agropecuária nacional, como constatado por Dias Filho (2014), que observou a troca das pastagens naturais pelas plantadas. O autor cita um incremento de 233% na área com pastagens plantadas e um decréscimo de 50% de pastagens naturais até o ano de 2006.

Uma das tecnologias que contribuem para o aumento de produtividade é a irrigação. O fornecimento de água no momento adequado e na quantidade exigida pela planta reduz as diferenças de produtividade durante o ano, tornando os sistemas agrícolas mais eficientes (VELOSO, 2012). Alguns trabalhos citam que o intervalo de pastejo é maior em pastagens não irrigadas, variando de 186 a 155 dias em áreas de sequeiro, e de 70 a 66 dias em áreas irrigadas (DANTAS *et al*., 2016).

A irrigação no Brasil ainda se mostra incipiente diante de seu potencial, segundo o estudo “Análise Territorial para o Desenvolvimento da Agricultura Irrigada” (FEALQ, 2014), O mesmo estudo aponta para um potencial de irrigação de 61 milhões de hectares, podendo alcançar o terceiro lugar mundial em áreas irrigadas, apenas atrás da Índia (70 milhões) e China (69,8 milhões) (FAOQUASTAT, 2016).

Fatores como entraves burocráticos na outorga do uso da água, licenciamento ambiental, custo e taxas de financiamento de equipamentos de sistema de irrigação, justificam o crescimento ainda paulatino (COELHO, 2007).

Portanto, é de suma importância a realização de estudos sobre a demanda de água para justificar investimentos em irrigação, visando máxima produtividade, mínimo uso de água e eliminação de desperdícios. Também se deve dar atenção ao manejo da irrigação, pois a falta ou o excesso podem acarretar em perdas de produtividade (BRITO *et al*., 2015).

3.4 Consumo hídrico e evapotranspiração de cultura

A agropecuária é responsável pelo uso de 69% da água doce captada no mundo (FAO, 2016). Sendo este um componente fundamental em vários setores (urbano, industrial, agrícola, lazer etc.), é necessário um bom conhecimento da demanda hídrica das culturas para um manejo de irrigação adequado, sem desperdícios, que reponha a água utilizada nos processos de evapotranspiração e permita que as culturas agrícolas expressem seu máximo potencial produtivo (SANTOS; HERNANDEZ; ROSSETTI, 2010).

De acordo com Jensen (1968), a evapotranspiração de cultura (ETc) é representada pela evaporação do solo e transpiração da planta, ou pelo acúmulo de água nas porções exteriores da planta por meio de precipitação, orvalho ou exsudação do interior da planta.

Atualmente há diversos métodos para estimar a ETc, tais como fluxo de seiva, sensoriamento remoto com dados de satélites, balanço hídrico ou modelagem direta por meio de dados de lisimetria (MARQUES, *et al*.,2015).

O método considerado como padrão para estimar a ETc é a lisimetria de pesagem (SCHMIDT *et al*., 2013). O sistema consiste na medição da variação de peso de um bloco de solo, que é convertida em estimativas de entrada e saída de água. O sistema de medição utiliza células de carga, cujos dados são utilizados para acompanhar a dinâmica de água no solo e determinar a drenagem e a evapotranspiração (POSS *et al*., 2004).

Embora haja outros tipos de lisímetro (de drenagem e de lençol freático constante), os lisímetros com células de carga são considerados os de maior confiabilidade nas medições (CRUZ-BLANCO *et al*., 2014) e têm como vantagens menores intervalos de medição, automação (MARTINEZ *et al*.,2014) e ampla capacidade de armazenamento de dados de variação de peso, pois geralmente são acoplados a sistemas de aquisição de dados (SCHMIDT *et al*., 2013).

Apesar de fazer medições diretas para determinação do consumo hídrico da cultura, ressalta-se o fato de a lisimetria de pesagem ser muito dispendiosa para instalação e manutenção, o que inclui a sua complexa instrumentação (VAUGHAN E AYARS, 2009). Além disso, há a limitação de toda essa estrutura estar fixa a um determinado espaço físico, não permitindo medições em grandes áreas, e tampouco são portáteis.

Visando à distribuição da lâmina de água necessária para a cultura atingir a produtividade potencial, e tendo-se em conta as limitações da lisimetria de pesagem, pode-se buscar alternativas, tais como métodos indiretos da determinação de consumo hídrico. Os métodos são: razão de Bowen, correlações turbulentas, sensoriamento remoto e balanço hídrico via clima ou solo (SALES,2016).

O método do balanço hídrico vem sendo muito utilizado para estimar evapotranspiração de várias culturas (WARD *et al*., 2012), por ter um custo de instrumentação e operacionalização menor que o lisímetro, e demonstrar concordância com o método direto (LIMA *et al*.,2006; SANCHES, 2017).

O balanço hídrico consiste na contabilização dos componentes de entrada e saída de água em um volume que abrange o sistema radicular da cultura em um determinado período. Este método engloba todos os processos de condução de água no sistema solo-planta-atmosfera, sendo uma das principais técnicas para determinar a evapotranspiração (SILVA *et al*., 2014).

3.5 Métodos de determinação de umidade do solo

No balanço hídrico é necessário o monitoramento da umidade do solo. Para sua determinação há métodos diretos e indiretos. A gravimetria é considerada o método direto padrão, com o qual se obtém a umidade presente no solo pela diferença de peso de uma amostra úmida e posteriormente seca em estufa. Todavia, o fato de ser um método dependente de coleta e secagem de solos, não permite a obtenção instantânea de resultados, devido ao tempo de 24 horas na estufa (SILVA, 2013). Isto é uma desvantagem que dificulta a tomada de decisão de curto prazo no manejo da irrigação.

Por sua vez, os métodos indiretos envolvem a medição de uma propriedade físico-quimica do solo que seja correlacionada ao conteúdo de água em determinado momento (LIMA; SILVA, 2012). As vantagens são: não necessitam de coletas frequentes de amostras de solo para determinação de umidade; são menos destrutivos que os métodos diretos; gastam menor tempo e trabalho para obtenção das medidas (VIONE, 2007). As principais limitações

dos métodos indiretos são a necessidade de calibração de aparelhos para as condições locais e o alto custo de alguns equipamentos (BERNARDO *et al*., 2009).

Algumas técnicas têm se destacado para estimativa do conteúdo de água do solo com precisão e segurança de operação, tais como a resistência elétrica, a Reflectometria no Domínio de Tempo (TDR) e a Reflectometria no Domínio de Frequência (FDR) (SOUZA *et al*., 2016).

3.6 Utilização de sensores no monitoramento da umidade do solo

Tecnologias de monitoramento em sistemas agrícolas vêm possibilitando o aprimoramento de manutenção local e controle de custos. Dados de umidade obtidos por meio destas tecnologias trazem dados mais precisos das condições de umidade do solo e da irrigação (PASIEKA *et al*., 2015). Uma dessas inovações que ainda está em etapa inicial na agricultura é a utilização de sensores, envolvendo diversas áreas como monitoramento ambiental, controle de máquinas e processos, e a agricultura de precisão (WANG *et al*.,2006).

Sensores são dispositivos que respondem a um impulso físico e o convertem em um sinal elétrico mensurável (voltagem, corrente ou carga) que seja compatível com circuitos eletrônicos (FRADEN, 2010).

Grande parte dos sensores que estimam o conteúdo de água do solo é constituída de sondas eletrônicas, que ao serem inseridas no solo transferem impulsos elétricos para a interpretação de controladores eletrônicos. Estes convertem os impulsos em medidas compreensíveis de umidade e apresentam os dados conforme a recomendação de calibração do fabricante. Ressalta-se que a heterogeneidade de características da matriz do solo (densidade, granulometria e teor de óxidos de ferro) pode influenciar a exatidão dos valores obtidos (GUIMARÃES *et al*., 2010).

Dentre os sensores aplicados à agricultura, é crescente o uso dos que utilizam o método de capacitância para determinar a umidade do solo. São métodos pouco destrutivos, fornecem medições instantâneas após a calibração, podem permanecer no solo por um longo período, são capazes de fornecer leituras contínuas em diferentes profundidades, e não necessitam de dados de radiação, permitindo medições próximas à superfície do solo (SOUZA *et al*., 2016).

3.7 Técnica capacitiva

Os sensores capacitivos funcionam como capacitores elétricos. Capacitores são componentes elétricos utilizados para armazenar energia, sendo constituídos de duas placas coaxiais carregadas, uma positiva e outra negativa. Para promover um acúmulo de carga no capacitor é necessário um material dielétrico entre as duas cargas, para que se possa impedir a geração de uma corrente entre elas. Ao se conectar a um circuito com um indutor, forma-se um circuito LC (indutor capacitor), que funciona como um oscilador, sendo responsável por gerar diferentes valores de frequência por meio do material dielétrico utilizado (CHAVEZ e EVETT, 2012).

Nos métodos de reflectância em domínio do tempo (*Time Domain Reflectometry* – TDR) e reflectância em domínio da frequência (FDR), a eficiência está atrelada à constante dielétrica do solo (K), uma das características que se altera em função da umidade. Topp *et al*. (1982) foram os primeiros a utilizarem a constante dielétrica para estimativa da umidade do solo no método TDR.

A constante dielétrica (K) é uma característica única dos materiais dielétricos, sendo estes não condutores ou que conduzem pouca corrente elétrica. Consiste da razão entre a permissividade do meio (ε) com a permissividade do vácuo (ε_0) (Equação 1).

$$K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon 0} \qquad (1)$$

Em que:

K – Constante dielétrica, adimensional;

ε – Permissividade do meio, F m^{-1}; e

ε_0 – Permissividade do vácuo, F m^{-1}.

A ação de um campo magnético em um material dielétrico alinha as moléculas polarizadas em sua composição, ocorrendo uma redistribuição de cargas e gerando uma pequena condução de corrente elétrica devido à polarização das moléculas do material dielétrico (HALLIDAY *et al*., 2009).

As constantes dielétricas variam entre 1 e 81 na matriz do solo, sendo que o ar possui o valor mínimo igual a 1, partículas solidas variam entre 3 e 5, e a água possui o máximo valor de 81 (SILVA *et al*., 2012).

Além da sonda TDR que foi precursora na técnica de capacitância, recentemente outra tecnologia baseada na variação da constante dielétrica do solo vem sendo utilizada no manejo

de irrigação, que é a reflectometria em domínio da frequência (*Frequency Domain Reflectometry* – FDR). Esta tecnologia fornece medições rápidas com precisão em diferentes profundidades e apresenta a vantagem de ter maior facilidade de aquisição de dados em relação à TDR, e de instalação (AL-GHOBARI *et al*., 2016).

Quando uma das placas da sonda FDR é eletrizada, o campo eletromagnético se expande para o solo, ocorrendo a polarização das moléculas de água. Quanto maior umidade do solo, menor será a quantidade de energia disposta na superfície da sonda, devido à menor eficiência do material dielétrico nessas condições. Portanto, quanto mais água houver no solo, maior a frequência que será gerada pelo oscilador (SILVA, 2008).

Sondas capacitivas possuem eficácia para estimar o conteúdo de agua no solo, porém, não conferem homogeneidade entre as leituras de diversos equipamentos. Portanto, para contornar essa limitação, é necessário um procedimento de normalização do aparelho. Basicamente, consiste na medição de pontos máximos e mínimos de frequência de oscilação que podem ser gerados pela sonda no perfil do solo (SENTEK, 2011).

Outra limitação da metodologia de capacitância é a necessidade de calibração local. Ainda que seja mais oneroso e trabalhoso, uma curva de calibração fornece leituras mais precisas de umidade do solo, mesmo que o manual do equipamento forneça uma calibração universal (PROVENZANO *et al*., 2016).

Segundo Mitchell *et al.* (2015), diversos fatores podem influenciar no valor de umidade do solo, dos quais destacam-se textura e estrutura, sendo que no caso de alteração na densidade do solo, estrutura e matéria orgânica, podem influenciar na retenção de água do solo, e que portanto, justifica a necessidade de se fazer uma calibração local de sondas FDR.

Oliveira *et al.* (2018) realizaram calibração de sonda FDR modelo Diviner 2000 em um Argissolo Vermelho distrófico na região de Campinas e obtiveram altos coeficientes de determinação (r^2) em relação à umidade volumétrica em áreas com diferentes tipos de preparo do solo. Os coeficientes foram de 96%, 91%, 89%, 88% e 82% em cultivo mínimo, subsolagem profunda, plantio direto, plantio convencional e calibração do solo, respectivamente. Souza *et al.* (2013) obtiveram coeficiente de determinação (r^2) superior a 90% utilizando sonda FDR para a medição de umidade em vasos sobre balanças em laboratório.

Oliveira (2016) realizou calibração de sonda FDR modelo EnviroScan em um Argissolo Vermelho distrófico na região de Campinas e obteve coeficientes de determinação que variaram de 67% a 91%, sendo os mais baixos constatados nas profundidades onde há maiores valores de densidade do solo e microporos, demonstrando que a textura e a estrutura do solo podem ser fontes de viés na calibração.

A técnica de capacitância possibilita estudos de avaliação elétrica do solo (SONCELA *et al.*, 2011), análise do movimento de água no solo (SOUZA e FOLEGATTI,2010; LOPES *et al*., 2010; BARROS *et al*., 2010), detecção da extração de água pelas raízes de determinada cultura (BRUNHARA *et al*., 2011; OLIVEIRA, 2016) e estimativa de evapotranspiração de cultura (OLIVEIRA NETO *et al*., 2011, SANCHEZ, 2017).

Nesse sentido, a estimativa de fluxos vem sendo uma das etapas importantes para se realizar estudos de determinação do consumo hídrico de culturas por meio do balanço hídrico (CRUZ *et al*., 2005; GHIBERTO *et al*., 2011; ZOUGMORÉ *et al*., 2004). Este método quantifica a variação do armazenamento de água no solo (ΔA) por meio das entradas e saídas de água em uma determinada profundidade, sendo que a variação de armazenamento, pode ser obtida pelo método de capacitância (FDR, TDR, sonda de nêutrons). Tal variação é descrita na equação 2:

$$\Delta A = P + I - ET \pm Q \qquad (2)$$

Em que:

P – precipitação pluvial;

I – irrigação;

ET – evapotranspiração; e

Q – fluxos de entrada e saída.

As entradas e saídas no solo (P, I, ET) são facilmente medidas ou estimadas (GHIBERTO *et al*., 2011), e as saídas por escoamento superficial podem ser desconsideradas dependendo do relevo onde a cultura foi instalada.

Os fluxos de água entre as camadas do solo (Q) são determinados por meio da equação de Darcy- Buckingham, e podem ser ascendentes em caso de ascensão capilar ou descendentes em caso de drenagem profunda (LIBARDI, 2005). Também é necessário se obter a condutividade hidráulica do solo não saturado (Ks) e fazer a determinação do gradiente por meio do uso do potencial hidráulico da água no solo (ψ_h). Em métodos indiretos, como no caso da sonda FDR, o potencial matricial (ψ_m) pode ser obtido por meio da curva característica de retenção de água no solo. A variável restante da equação é a evapotranspiração (GHIBERTO *et al*., 2011).

Primo *et al.* (2013) utilizaram o balanço hídrico por meio de sonda FDR modelo Diviner 2000 para determinar o consumo hídrico em três clones de palma forrageira na região de Serra Talhada-PE. Os autores obtiveram uma evapotranspiração acumulada de 1173 mm em um período de 499 dias, e média diária de 2,22 mm.

Silva *et al.* (2015) utilizaram uma sonda FDR modelo PR2/6 Delta T (Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK) para monitorar o armazenamento de água no balanço hídrico em cana-de-açúcar, em condições de sequeiro e com lâminas de irrigação de 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração de referência (ETo), e obtiveram valores médios de consumo hídrico de 2,80 mm dia^{-1}, 3,10 mm dia^{-1}, 3,6 mm dia^{-1}, 3,86 mm dia $^{-1}$, 4,14 mm dia^{-1}, respectivamente.

Sanches (2017) comparou o método de balanço hídrico por meio de sonda FDR modelo Diviner 2000 com a lisimetria de pesagem, em cultivos de Mombaça e Cynodon, solteiros e sobressemeados com aveia preta e azevém, na região de Piracicaba-SP. O autor obteve elevados coeficientes de determinação (r^2 entre 0,98 e 0,99) e considerou que é possível utilizar sondas FDR para o balanço hídrico de culturas.

3.8 Desenvolvimento Radicular

A distribuição do sistema radicular no perfil do solo e sua interação com o ambiente possui relação direta com a produtividade final de uma cultura, influenciando a capacidade de brotação e/ou germinação, absorção de nutrientes, resistência a patógenos e pragas, e tolerância a seca (VASCONCELOS e DINARDO-MIRANDA, 2011).

Quanto maior o volume no perfil do solo ocupado pelo sistema radicular de uma determinada planta, maior o aproveitamento de nutrientes, oxigênio e água (BENGOUGH *et al*., 2011). Modificações geométricas no sistema radicular são decorrentes de determinada alteração no ambiente e no solo. Como consequência há diferentes reações fisiológicas interferindo no desenvolvimento da cultura em condições de estresse (SMITH *et al*., 2005).

Visando ao aumento de eficiência no manejo da irrigação, deve-se projetar sistemas que distribuam lâminas de irrigação adequadas, sem excesso. Daí surge a necessidade de determinar ou estabelecer uma meta de profundidade efetiva do sistema radicular das culturas irrigadas, de modo que o sistema de irrigação abasteça a maioria de raízes finas ou absorventes. Essas raízes devem receber água no momento adequado e na quantidade correta (SANTOS *et al*., 2005). SMIT *et al*. (2000) definiram que a profundidade efetiva do sistema radicular, na qual há mais raízes absorventes das culturas, equivale a 90% de seu comprimento total no perfil do solo.

Forrageiras do gênero *Urochloa* possuem um sistema radicular fasciculado e de estabelecimento rápido, o que possibilita uma melhor estruturação do solo, promovendo o aumento da estabilidade de agregados e da macroporosidade, formando canais nos perfis do solo (SALTON *et al*., 2014). Alencar (2007) avaliou a profundidade efetiva do sistema radicular de seis capins irrigados na região leste de Minas Gerais e encontrou que a profundidade efetiva do capim Marandu foi de 65 cm.

Cunha *et al.* (2010) avaliaram a profundidade efetiva do sistema radicular de seis gramíneas tropicais sob doses crescentes de nitrogênio no município de Governador Valadares, MG, e constataram que o capim marandu foi o que alcançou maior profundidade, com 39,8 e 49,82 cm nas doses de 100 kg N ano^{-1} e 500 kg N ano^{-1}, respectivamente. Cabe frisar que nesse estudo a profundidade efetiva foi considerada 80% de seu comprimento no solo.

Há poucos estudos sobre sistema radicular de forrageiras no Brasil, provavelmente pelo fato da metodologia ser robusta e dispendiosa, mesmo que tal informação seja fundamental para diversas áreas das ciências agrárias (TERUEL *et al*., 2000; CECATO *et al*., 2004; CUNHA *et al*., 2010). Em outros cultivos, como cana de açúcar, estudos relacionados ao trafego de colhedoras, espaçamento e dinâmica de água no solo com utilização de água de reuso despertam o interesse na investigação de seus efeitos sobre o sistema radicular, diante das possíveis alterações no solo.

Sousa *et al.* (2013) conduziram experimento com cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial, em Piracicaba-SP, com tratamentos baseados na demanda hídrica da cultura (DH). Os autores constataram redução de área ocupada e comprimento de raízes em tratamentos com lâminas de irrigação de 100% DH e 200% DH, em comparação aos tratamentos com 50% DH e sem irrigação. Os autores comentam que isto se deve ao fato de a cultura aprofundar seu sistema radicular para buscar água em maiores profundidades, uma reação à condição de estresse em condições de menor disponibilidade hídrica.

Esteban (2018) realizou um experimento com controle de trafego e diferentes espaçamentos em cana-de-açúcar e observou maior biomassa seca do sistema radicular nas áreas com controle de trafego, sendo 17,9% maior em espaçamento de 1,5 m e 18,5% maior em espaçamento duplo combinado (1,5 m x 0,9 m), em comparação aos tratamentos sem manejo do trafego e com espaçamento simples. O maior desenvolvimento do sistema radicular refletiu no incremento de produtividade, de 9 a 12% em espaçamento de 1,5 m, e de 21 e 18% no espaçamento duplo combinado, respectivamente na terceira e quarta colheita.

3.9 Coeficiente de cultura (Kc)

Indicadores resultantes de metodologias envolvendo elementos micrometeorológicos e estimativas de consumo hídrico são importantes para um manejo racional da irrigação (SILVA *et al.* 2012). O coeficiente de cultura (Kc) é um desses indicadores, que representa a relação entre a evapotranspiração da cultura (ETc) e a evapotranspiração de referência (ETo). Tal relação e, consequentemente os valores de Kc, depende da espécie, da altura do dossel vegetal, da área foliar e do manejo da cultura (ALLEN *et al*., 1998).

Os valores de Kc vêm sendo recomendados pela Food and Agriculture Organization (FAO) como parâmetro para estimativa de demanda hídrica de cultivos a partir de dados climáticos. No entanto, os valores indicados são dados médios obtidos a partir de diferentes regiões do mundo e consideram a duração do estádio fenológico de cada cultura, que pode variar conforme o clima local. Portanto, são necessários estudos regionais de Kc a fim de aumentar a precisão das estimativas de demanda hídrica de determinado lugar (RIBEIRO *et al*., 2009).

As pesquisas de Kc em forrageiras vêm mostrando valores médios e máximos de Kc maiores que 1,00 devido à elevada ETc (BARBOSA *et al*., 2015; ANTONIEL *et al*.,2016; SANCHES *et al*., 2017). Santana *et al.* (2016) realizaram um experimento com o capim Tifton-85 (*Cynodon spp.*) em Uberaba-MG, utilizando a tensiometria como método para coleta de dados de umidade do solo, e constataram que o valor médio de Kc foi de 1,07 e a ETc média em ambiente irrigado foi de 3,62 mm dia^{-1}.

Antoniel *et al.* (2016) realizaram um experimento com capim Mombaça em Cidade Gaúcha-PR, com intervalo de corte entre 30 e 40 dias, e obtiveram valores máximos de Kc de 1,33 ao final do ciclo. Barbosa *et al.* (2015) estudaram o consumo de água de em *Panicum maximum* (Syn. *Megathyrsus maximus*) cv. Tanzânia e obtiveram valores de Kc que variaram de 0,64 a 1,20 em 30 dias.

Estudos de determinação de Kc em sistemas consorciados são escassos na literatura (GAO *et al*., 2009). Sanches (2017) realizou um experimento de cultivo consorciado de forrageiras tropicais e de inverno em Piracicaba-SP, medindo o consumo de água em lisímetros e determinando os valores de Kc ao final de ciclos 42 dias. O autor obteve valores de Kc entre 0,98 e 1,10 para capim Mombaça, aveia preta e azevém, e Kc de 1,04 em consórcio entre *Cynodon* spp e aveia preta + azevém.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização local

O experimento foi conduzido entre setembro de 2017 e setembro de 2018 em uma área experimental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), no município de Piracicaba, localizado em latitude 22º14'02" S e longitude 47º37'23" O, em uma altitude de 569 metros. Segundo a classificação climática de Köppen realizada por Alvares *et al*. (2013), o clima regional é Cwa (quente chuvoso e inverno seco). A classificação do solo local onde foi realizado o experimento é Nitossolo Vermelho eutroférrico latossólico (SANTOS *et al.*, 2013).

A área experimental foi dividida em duas parcelas de 12 x 12 metros (Figura 1), nas quais foi plantado capim Marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) desde o ano de 2016. Ambas tinham cultivo exclusivo do capim Marandu no período primavera/verão e sobressemeadura no período outono/inverno. As culturas de inverno utilizadas foram a aveia preta (*Avena strigosa* cv. IAPAR 61), azevém (*Lolium multiflorum* cv. BRS Ponteio), e centeio (*Secale cereale* cv IPR 89). A sobressemeadura foi realizada à lanço no dossel de capim Marandu, em que uma parcela experimental foi destinada para estudos de sobressemeadura com aveia preta + azevém, e outra parcela com centeio + azevém. A taxa de semeadura das culturas de inverno foram de 100 kg ha^{-1} de centeio e aveia preta e 50 kg ha^{-1} de azevém. A fim de garantir a germinação das sementes, após a sobressemeadura foi feita a irrigação de ambas parcelas com lâmina de 25,00 mm, e após 4 dias foi realizada a adubação a lanço de 50 kg ha^{-1} de nitrogênio, por meio de ureia.

Em cada parcela foram instalados três tubos de acesso para medição da umidade do solo com sonda capacitiva FDR (Diviner®), dispostos ao redor de um lisímetro de pesagem, totalizando seis tubos de acesso e dois lisímetros (Figura 1).

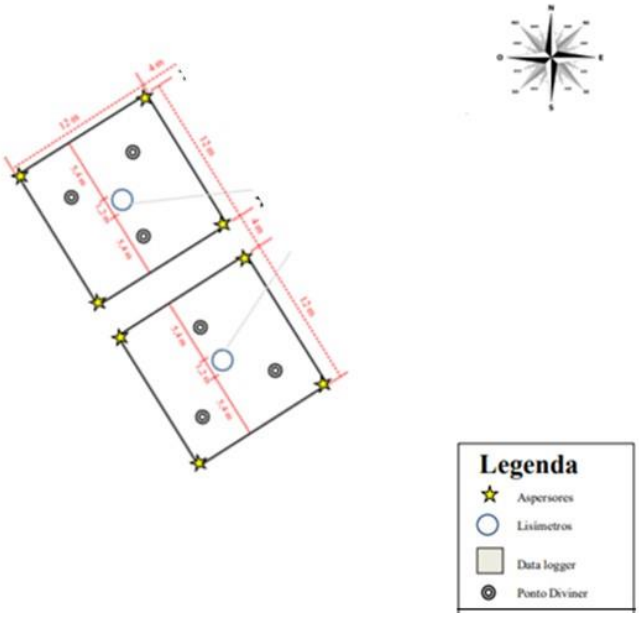

Figura 1: Croqui da área experimental, ESALQ/USP, Piracicaba/SP, 2018.

A precipitação pluvial durante o período experimental foi de 977,3 mm, valor abaixo da média histórica anual de 1275,5 mm na região de Piracicaba. Foi necessário a suplementação de água por irrigação de 471,1 mm na parcela 1 e 399,6 mm na parcela 2; ressalta-se a diferença de lâminas de irrigação foi em decorrência da diferença do consumo hídrico das culturas de inverno sobressemeadas. A distribuição temporal das chuvas, da irrigação, da umidade relativa média do ar e das temperaturas média e mínima, é evidenciada na Figura 2.

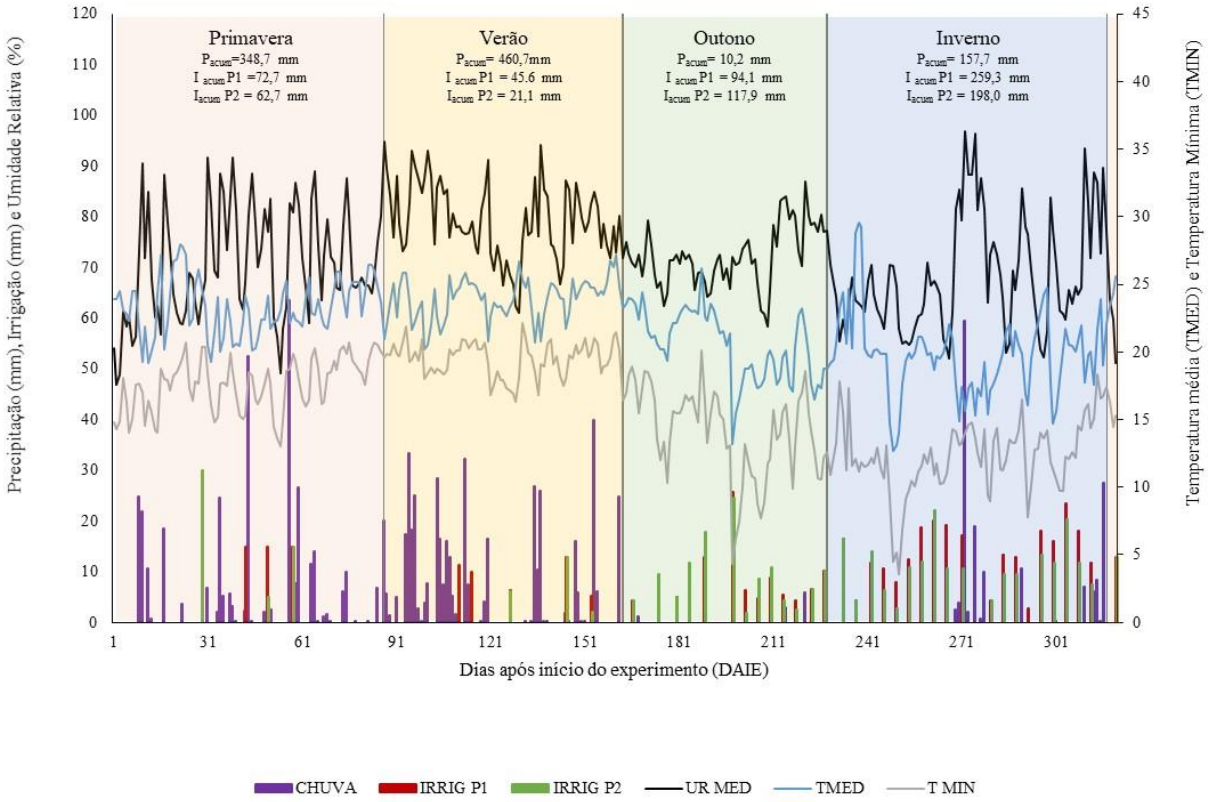

Figura 2: Valores de precipitação (mm), umidade relativa (URmed, %), temperatura mínima (Tmin, ºC) e temperatura média (Tmed, ºC) durante o período experimental 09/2017 a 09/2018. Piracicaba: Pac= precipitação acumulada no período; Iac = irrigação acumulada média

4.2 Caracterização física do solo

4.2.1. Caracterização química do solo

A caracterização química inicial foi feita anteriormente ao início do experimento e encontra-se na Tabela 1. O manejo da fertilidade do solo foi realizado conforme recomendação de Raij *et al.* (1996).

Tabela 1: Análise química do solo da área experimental de acordo com a camada de solo de 0-20 cm e 20-40 cm. Piracicaba/SP, 2017.

Camada	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	V	CTC
(cm)	$CaCl_2$	mg dm^{-3}	mmolc dm^{-3}					%	mmolc dm^{-3}
0-20	5,9	30	3	33	18	18	0	75	72
20-40	5,9	11	0,6	28	15	20	0	69	64

P=fósforo; K=potássio; Ca= cálcio, Mg=magnésio; H+Al= acidez potencial; Al= alumínio trocável; CTC=complexo de troca catiônica; V = percentagem de bases.

No início de cada ciclo de crescimento foi feita adubação nitrogenada com ureia, aplicada nas doses de 100 e 50 kg ha^{-1} de N nos períodos de primavera-verão e outono-inverno, respectivamente.

4.2.2.Densidade, porosidade, condutividade hidráulica e granulometria

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico proposto pela Embrapa (1997), por meio da razão entre a massa de solo seco em estufa a 105ºC e o volume da amostra.

Para determinar a distribuição de macro e microporosidade no perfil do solo (Tabela 2), foi utilizado o método da mesa de tensão definido pela Embrapa (1997), em que amostras indeformadas foram coletadas nas profundidades 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm, 50-60 cm, 60-70 cm, 70-80 cm, 80-90 cm, sendo amostrados três (03) anéis volumétricos por profundidade. Posteriormente, as amostras foram levadas ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB -ESALQ/USP), onde foram preparadas (acerto da amostra no anel e envolvimento com tecido e tira de borracha em uma das extremidades) e inseridas em bandeja com água por 72 h até atingirem a saturação. Após saturadas, foram pesadas em balança com precisão centesimal e, em seguida, colocadas em mesa de tensão de 6,0 kPa por mais 72 h, sendo então levadas a uma estufa para secagem a 105ºC por 24 h, e posteriormente foram pesadas novamente. A porosidade total (PT) correspondeu à massa de água que ocupou todo espaço poroso (saturação), e a macroporosidade foi obtida por diferença entre a PT e a microporosidade, que foi determinada com a equação 1:

$$\text{Micro} = \frac{a-b}{c} \qquad (1)$$

Em que:

Micro – microporosidade (decimal);

a – Massa da amostra submetida a uma tensão de 6,0 kpa de coluna de água (g);

b – Massa da amostra seca a 105°C (g); e

c – Volume do cilindro (cm^3).

Para estudo da condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) (Tabela 2) foram utilizadas amostras indeformadas de solo, coletando-se cinco (05) repetições a cada camada de solo considerada (0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m, 0,3-0,4 m, 0,4-0,5 m, 0,5-0,6 m, 0,6-0,7 m, 0,7-0,8 m, 0,8-0,9 m), totalizando 45 amostras no horizonte pedológico.

As amostras foram retiradas com um cilindro de Uhland, com volume de 37,93 cm^3. As amostras foram coletadas em trincheiras de 2 metros de profundidade, ao lado das parcelas experimentais. A seguir, foram protegidas com alumínio e postas em caixas térmicas visando evitar o seu ressecamento.

Posteriormente à coleta no campo, as amostras foram levadas ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biossistemas, na ESALQ/USP, onde as mesmas foram aparadas por meio de faca, protegidas com tecido e tiras elásticas em uma de suas extremidades e colocadas em uma bandeja com água até atingir a saturação com água, sendo o tempo mínimo de 48 horas.

Após a saturação, as amostras foram instaladas em um dispositivo com carga d'água constante e fluxo descendente, medindo-se a vazão percolada (volume percolado por unidade de tempo) até que este se tornasse constante. A partir daí, calculou-se o valor de Ko por meio da equação 2, que é uma adaptação da equação de Darcy:

$$Ko = \frac{Qa\ X\ L}{A\ (H+L)} \qquad (2)$$

Em que:

Ko – Condutividade hidráulica saturada, (cm h^{-1});

Qa – Vazão percolada por meio da amostra (cm^3 h^{-1});

L – Altura da camada da amostra (cm), medida com régua;

A – Área da secção transversal da amostra (cm^2); e

H – Carga hidráulica sobre a amostra em (cm).

Tabela 2: Caracterização inicial do solo da área experimental quanto à microporosidade (Micro, cm^3 cm^{-3}), macroporosidade (Macro, cm^3 cm^{-3}), porosidade total (PT, cm^3 cm^{-3}), densidade do solo (Ds, g cm^{-3}) e condutividade hidráulica (cm h^{-1}). Piracicaba-SP, 2019.

Camada (m)	Fator	Parâmetros				
		Micro	Macro	PT	Ds	Ko
0-0,1	Média	0,07	0,43	0,5	1,39	1,30
	CV (%)	33,2	6,24	1,94	9,68	59,18
0,1-0,2	Média	0,04	0,44	0,48	1,55	1,20
	CV (%)	15,8	4,41	4,96	0,26	63,22
0,2-0,3	Média	0,04	0,41	0,45	1,62	1,07
	CV (%)	34,67	1,95	2	1,56	64,16
0,3-0,4	Média	0,04	0,41	0,45	1,6	1,13
	CV (%)	26,37	2,08	3,81	3,08	19,45
0,4-0,5	Média	0,04	0,44	0,48	1,49	1,04
	CV (%)	4,78	1,16	1,24	3,14	70,00
0,5-0,6	Média	0,05	0,45	0,5	1,48	0,96
	CV (%)	44,63	2,61	5,3	5,58	28,41
0,6-0,7	Média	0,15	0,38	0,53	1,25	0,93
	CV (%)	39,61	5,16	8,77	8,42	73,82
0,7-0,8	Média	0,14	0,4	0,54	1,27	0,44
	CV (%)	42,49	12,15	5,51	10,56	71,51
0,8-0,9	Média	0,14	0,4	0,54	1,3	0,17
	CV (%)	20,13	5,4	0,99	4,58	63,38

Para determinação da textura do solo foram retiradas amostras nas mesmas profundidades utilizadas na determinação da macro e microporosidade. A amostragem foi realizada com método destrutivo, conforme descrição da Embrapa (1997), com amostras coletadas por meio de trado holandês, sendo três (03) repetições por profundidade.

Posteriormente, as amostras foram levadas ao Laboratório de Física de Solo do LEB-ESALQ/USP, onde foram secas ao ar por 72 h, destorroadas e postas em sacos plásticos. Logo após, foram depositadas em frascos de 600 mL e pesadas em balança centesimal, atingindo valores próximos a 55 gramas. Adicionou-se 200 mL de água e 10 mL de NaOH (40 g L^{-1} de água) em cada frasco. Em seguida foram encaminhadas a um agitador de 120 rpm por 16 horas. O liquido foi despejado em provetas, que foram preenchidas com água até atingirem 1 litro; após um (01) minuto de agitação, um densímetro foi introduzido na proveta e aguardou-se 40 segundos para fazer a primeira leitura. Posteriormente, aguardou-se mais duas (02) horas para fazer a segunda leitura com o densímetro. Também foram medidas e anotadas as temperaturas nos respectivos tempos de leitura. A análise dos dados foi feita com base no método de Bouyoucos (1927), determinando-se os teores de argila, areia e silte, em porcentagem (Tabela 3).

Tabela 3:Caracterização inicial do solo da área experimental quanto à composição granulométrica (%), Piracicaba-SP 2019.

Camada (m)	**Fator**	**Parâmetros**		
		Argila%	**Silte%**	**Areia%**
0-0,1	Média	46,2	20,43	33,38
	CV (%)	2,96	4,15	6,4
0,1-0,2	Média	51,07	18,72	30,21
	CV (%)	4,6	9,81	5,51
0,2-0,3	Média	54,75	15,48	29,77
	CV (%)	3,12	11,33	1,62
0,3-0,4	Média	58,79	15,68	25,53
	CV (%)	3,01	3,23	6,26
0,4-0,5	Média	60,88	13,53	25,59
	CV (%)	3,28	12,47	2,47
0,5-0,6	Média	61,13	13,19	25,69
	CV (%)	3,89	11,91	3,31
0,6-0,7	Média	60,42	10,75	28,83
	CV (%)	2,78	22,75	12,39
0,7-0,8	Média	59,64	13,16	27,2
	CV (%)	3,37	17,89	5,64
0,8-0,9	Média	59,69	13,69	26,63
	CV (%)	3,07	22,23	15,02

4.2.3. Curva característica de retenção de água no solo

No período de 17 de setembro de 2015 a 26 de junho de 2018 foram coletadas amostras indeformadas de solo, por meio de anéis de Kopeck, para a elaboração das curvas características de retenção de água no solo. As amostras foram retiradas em trincheiras, em camadas com espessura de 10 cm, até a profundidade de 90 cm, com três coletas por profundidade. Posteriormente, as amostras foram levadas ao Laboratório de Física do Solo do LEB-ESALQ/USP para a determinação da retenção de água com sete (07) pontos de potencial matricial (ψ_m : 0; 2-6; 10; 30; 50; 100; 500 e 1500 kPa). O primeiro ponto (0 kPa) foi obtido por pesagem, logo após a retirada das amostras da bandeja com água. Para o ponto coletado a ψ_m = 2 a 6 kPa foi utilizada a mesa de tensão. Para os demais pontos (10 a 1500 kPa) utilizou-se a câmara de pressão de Richards (Tabela 4). A curva de retenção foi obtida por meio de regressão baseando-se no modelo de van Genutchen (1980) (Equação 3), utilizando o programa computacional *Retention Curve* – RETC (1998) (Figura 3).

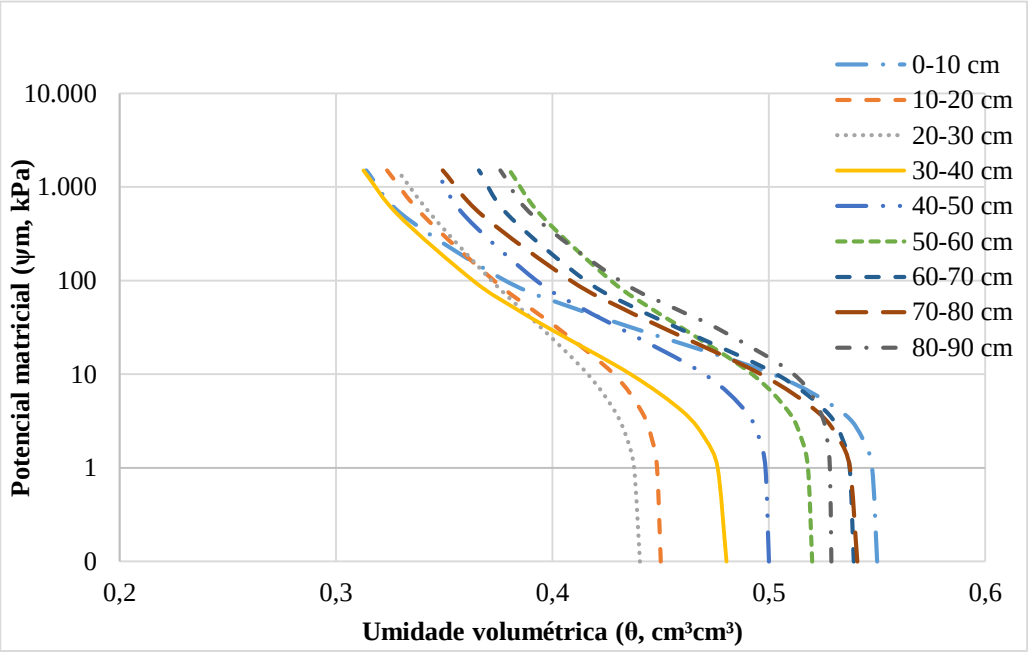

Figura 3: Curva de retenção de água no solo conforme modelo de van Genutchen (1980) para 9 camadas avaliadas em Nitossolo Vermelho eutroférrico latossólico, Piracicaba-SP, 2018.

Tabela 4: Umidade volumétrica em função do potencial matricial e da profundidade de amostragem. Piracicaba/SP, 2017.

kPa	Umidade com base volumétrica (cm³ cm³)									
	0,1 m	**0,2 m**	**0,3 m**	**0,4 m**	**0,5 m**	**0,6 m**	**0,7 m**	**0,8 m**	**0,9 m**	**Média**
0	0,55	0,45	0,44	0,48	0,5	0,52	0,54	0,54	0,53	0,50
1	0,5	0,43	0,42	0,44	0,47	0,49	0,50	0,50	0,51	0,47
2	0,47	0,41	0,4	0,41	0,45	0,48	0,48	0,47	0,49	0,45
4	0,42	0,4	0,39	0,39	0,42	0,45	0,45	0,44	0,47	0,43
10	0,37	0,37	0,37	0,36	0,39	0,42	0,41	0,40	0,43	0,39
30	0,35	0,35	0,36	0,34	0,37	0,41	0,39	0,38	0,40	0,37
50	0,33	0,34	0,34	0,33	0,36	0,39	0,38	0,37	0,39	0,36
100	0,32	0,33	0,33	0,32	0,35	0,39	0,37	0,36	0,38	0,35
500	0,31	0,31	0,32	0,3	0,34	0,37	0,36	0,34	0,37	0,34
1500	0,29	0,3	0,3	0,29	0,33	0,36	0,35	0,32	0,36	0,32

$$\theta i = \theta r + \left[\frac{(\theta s - \theta r)}{[1+(\alpha|\Psi|)^n]^m}\right] \quad (3)$$

Em que:

θ – umidade atual do solo (cm^3cm^{-3});

θr – umidade residual do solo obtida por meio da curva de calibração (cm^3cm^{-3});

θs – umidade de saturação do solo (cm^3cm^{-3});

α, n, m – coeficientes de ajuste do modelo; e

Ψ – potencial matricial do solo (kPa).

4.3.Delineamento experimental

O experimento foi conduzido sob delineamento experimental de inteiramente casualizado, considerando os ciclos produtivos como tratamentos. Durante o ano experimental, foram realizadas amostragem em cultivo exclusivo de capim Marandu, com sete ciclos de coleta (7 CDC), entre 21/09/2017 e 10/05/2018, sendo seis (6) CDC de 28 dias e um (1) de 35 dias (transição para sobressemeadura). Posteriormente, houve amostragem em cultivo consorciado de capim Marandu consorciado com aveia preta e azevém em uma das parcelas experimentais, e em outra parcela, o de capim Marandu + centeio + azevém, sendo ambos em 3 CDC (entre 21/05/2018 e 24/09/2018) (Tabela 5).

Tabela 5: Datas e períodos de corte do capim Marandu exclusivo e sobressemeado, realizados durante o período experimental. Piracicaba/SP, 2017-2018.

	Marandu Solteiro**	MAA ***	MCA***
CDC	Início e fim de cada ciclo		
1	21/09 a 18/10/2017	-----	-----
2	19/10 a 17/11/2017	-----	-----
3	18/11 a 15/12/2017	-----	-----
4	16/12 a 15/01/2018	-----	-----
5	17/01 a 13/02/2018	-----	-----
6	16/02 a 15/03/2018	-----	-----
7*	06/04 a 10/05/2018	-----	-----
8	-----	21/05 a 28/06/2018	21/05 a 28/06/2018
9	-----	29/06 a 09/08/2018	29/06 a 09/08/2018
10	-----	15/08 a 24/09/2018	15/08 a 24/09/2018

*Corte do capim no período de ciclo de transição de 35 dias. ** Corte do capim exclusivo ***Corte do capim sobressemeado. MAA- Marandu + Aveia Preta + Azevém. MCA – Marandu + Centeio + Azevém.

Foram quatro (04) repetições para os dados de análise biométrica da parte aérea (matéria fresca e seca da parte aérea, material morto e índice de área foliar ao fim de cada ciclo), e também para a variável produtividade de água. Para a variável altura do dossel, foram realizadas 10 (dez) coletas ao fim de cada ciclo.

Na análise de raízes, foi realizada uma amostragem por estação, sendo estas como tratamento. Na análise do sistema radicular das culturas consorciadas, foi realizada uma análise descritiva dos dados (Vide item 3.7).

As amostragens de umidade do solo foram utilizadas na estimativa da evapotranspiração das culturas (ETc) e do coeficiente de cultura (Kc).

Adicionalmente à amostragem de umidade, foi feita a coleta de amostras de forragem para a determinação de parâmetros auxiliares, tais como a produção de matéria seca e a produtividade de água. Os ciclos de coleta (CDC) foram estabelecidos devido às características de crescimento das forrageiras estudadas, bem como à influência dos elementos climáticos sobre seu desenvolvimento. A altura de corte foi estabelecida em 0,15 m, segundo recomendações de Da Silva (2005) (altura entre 0,10 m e 0,20 m, em experimento com pastejo), e Gimenes *et al.* (2011) (altura pós-corte de 0,15 m, em experimento sem pastejo).

4.4. Sistema de Irrigação

O sistema de irrigação utilizado no experimento foi o de aspersão convencional, utilizando aspersores modelo 427B (NaanDanJain) com vazão de 590 L h^{-1} e pressão de operação de 303 kPa (30 mca). A linha principal é constituída de PVC rígido de 50 mm de diâmetro nominal (DN) e de 25 mm de DN nas linhas secundárias. O conjunto também inclui uma motobomba Thebe modelo P-11/2 NR, com potência de 1,0 CV; 4 válvulas solenoides (Geva 75 1/8” 3W 24 VAC) e 4 válvulas Bernard S200 1”; e um (01) controlador automático Galcon AC-6S 8056 220 V.

O sistema foi instalado com espaçamento 12 m x 12 m (aspersores x linhas), e dimensionado com intensidade de aplicação inferior à velocidade de infiltração básica do solo de 15 mm h^{-1} para solos argilosos, a fim de se evitar encharcamento e escoamento superficial da água.

A uniformidade de aplicação do sistema de irrigação foi testada no campo por meio da coleta de lâminas d’água em espaçamentos regulares (1,5 m entre coletores) e do cálculo do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). Como resultado, obteve-se CUC = 87%, sendo a irrigação classificada como de boa uniformidade segundo Mantovani (2001).

O turno de rega foi variável, de acordo com o consumo de água das culturas medido nos lisímetros instalados nas parcelas. As lâminas líquida e bruta de irrigação (Li e Lb, em mm) foram determinadas por meio das equações 4 e 5, respectivamente, considerando-se uma eficiência da irrigação de 85% (irrigação noturna):

$$\mathrm{Li} = \frac{(P_{cc} - P_a)}{z_{lis}\ A_{lis}}\ z \qquad (4)$$

Em que:

Li – lâmina líquida de irrigação (mm);

P_{cc} – pesagem na capacidade de campo (kg);

P_a – pesagem na umidade atual (kg);

z_{lis} - profundidade do lisímetro (z_{lis} = 60 cm);

A_{lis} – área da superfície do lisímetro (m^2); e

z – profundidade efetiva das raízes (cm).

Adotou-se z = 90 cm para se conseguir uma distribuição de água em todas as profundidades amostradas com a sonda FDR, considerando a possibilidade de o sistema radicular na área experimental ter profundidade efetiva superior à dos lisímetros.

$$\mathrm{Lb} = \frac{Li}{Ei} \qquad (5)$$

Em que:

Lb – lâmina bruta de irrigação (mm);

Ei – Eficiência de irrigação (decimal).

4.5. Sonda Capacitiva (FDR)

A sonda capacitiva utilizada foi a FDR modelo Diviner® (Sentek). Os componentes da sonda são constituídos por: unidade de controle e registro, com display e *datalogger*, no qual se pode efetuar operações como criar, salvar, apagar e exibir até 99 perfis de solo; sonda, haste de 1,6 m de comprimento e cabo para conexão (porta RS 232) da sonda com o *display*; uma bateria como fonte de energia; caixa de cor branca em poliestireno tamanho-190x38x45 mm e peso de 750 gramas (Figura 4).

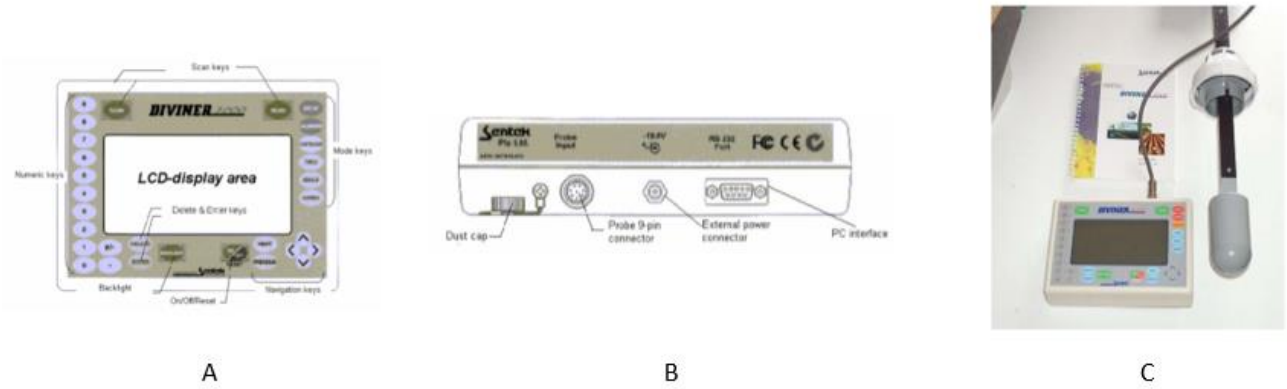

Figura 4: Componentes da sonda Diviner 2000. A - Unidade de controle (*display* e datalogger). B - Painel de conexões (Parte traseira da unidade de controle). C – Sonda, haste e cabo de conexão. Piracicaba/SP. Fonte Sanches (2016).

Os tubos de acesso da sonda foram de PVC, com diâmetro de 50 mm e comprimento de 1,4 m, e foram instalados na área experimental até a profundidade de 1,3 m, mantendo 0,1 m acima da superfície do solo (Figura 5).

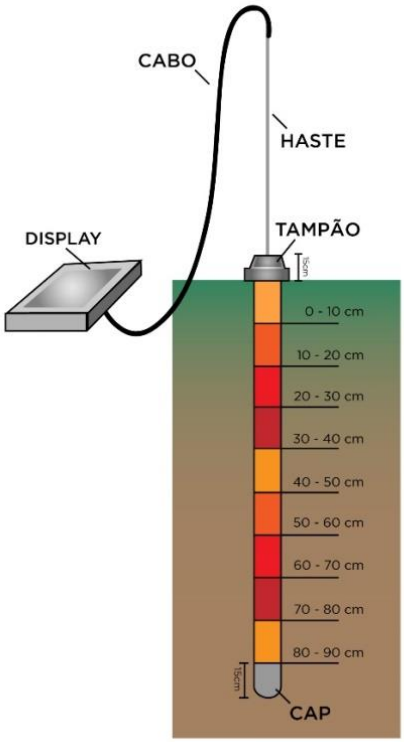

Figura 5: Esquema da sonda Diviner com tubo de acesso instalado para medições até 90 cm de profundidade. Piracicaba/SP, 2018.

A profundidade útil de medida foi de 1,2 m (tampão de fundo ocupando 0,1 m). O sensor da sonda era introduzido e baixado até o fim do tubo, fazendo a varredura de frequência relativa (FR) com medidas pontuais a cada 10 cm de profundidade. Os valores de FR foram convertidos em umidade do solo (em mm) por meio de uma curva de calibração, feita previamente ao início da coleta de dados.

A calibração da sonda capacitiva foi realizada tendo como base o roteiro do fabricante, proposto em Sentek (2011), sendo utilizados três níveis de umidade. Foram instalados tubos ao lado da área irrigada, exclusivamente para a calibração. Para se atingir um nível de umidade alto, no dia anterior à coleta foram aplicados cerca de 250 mm de água em um anel infiltrômetro que circundava cada tubo de calibração. Para a medição da umidade em solo seco, esperou-se até que a umidade do solo atingisse um nível próximo ao ponto de murcha permanente, obtido a partir da curva característica de retenção de umidade do solo. A medição de umidade intermediária foi realizada 2 dias após uma sequência de 5 dias de precipitação pluvial, que totalizaram 51,3 mm (Figura 6).

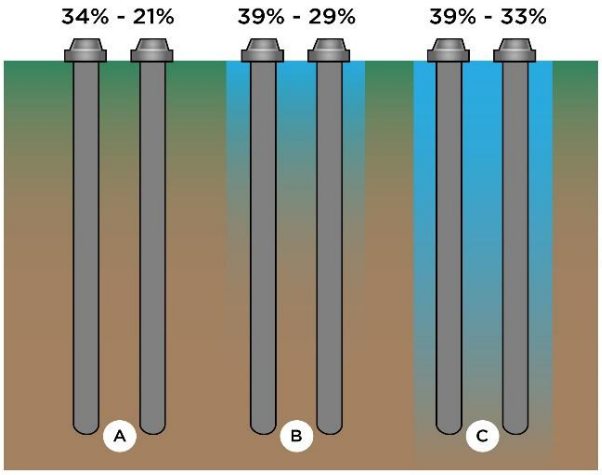

Figura 6: Representação esquemática dos níveis de umidade utilizados para retirada de amostras indeformadas utilizadas na calibração da sonda FDR. A - solo em condição seca. B - solo em umidade intermediária. C - solo em umidade alta.

Primeiramente, foi necessária à instalação manual de seis tubos, dois a dois, representando solo saturado, na capacidade de campo e seco. (Figura 7a). Posteriormente, foram abertas três trincheiras de dois metros de profundidade (Figura 7b) com o auxílio de uma retroescavadeira, nas quais foi possível coletar manualmente as amostras indeformadas de solo a cada 10 cm de profundidade (Figura 7c). A amostragem foi feita por meio de anéis volumétricos de metal, sendo três repetições por camada (Figuras 7d e 7e).

Enquanto se coletava o solo, era feita a varredura de dados com o sensor FDR em todas profundidades, para a comparação dos dados de frequência relativa (FR) com a umidade do solo (θ). Após a coleta das amostras de solo, estas foram alocadas em caixa térmica para evitar perda de água por evaporação. Posteriormente, obteve-se o peso úmido de cada amostra, que logo após foram levadas a uma estufa elétrica na temperatura de 105ºC até peso constante.

Figura 7: a) Instalação do tubo para posterior leitura da sonda FDR. b) Escavação com retroescavadeira para abrir a trincheira. c) Retirada manual de solo com picareta para coletar amostras em diferentes profundidades. d) e e) Coleta de solo por meio de três.

Para conferir homogeneidade entre as leituras, foi realizado o processo de normalização. Consiste na obtenção de pontos de frequência de oscilação máximo e mínimo. Para obter o ponto mínimo, a sonda foi normalizada dentro de um tubo totalmente suspenso no ar, e para obtenção do ponto máximo, foi utilizado o mesmo tubo, porém, introduzido em uma caixa térmica com água deionizada. Com a obtenção do pontos, foi possível obter a Frequência Relativa (FR), por meio da equação 6:

$$FR = \frac{(Fa - Fs)}{(Fa - Fw)} \qquad (6)$$

Em que:

Fa - frequência no tubo de PVC (Fa = 183.186);

Fs - frequência no tubo de PVC no solo; e

Fw - frequência no tubo de PVC (Fw = 126.686).

As equações de calibração da umidade volumétrica atual (θ_a, $cm^3\ cm^{-3}$) em relação à frequência relativa (FR) específicas de cada camada de solo foram obtidas por regressão potencial e seguem o modelo apresentado na equação 7:

$$\theta = a\ FR^b \tag{7}$$

Em que:

a e *b* – parâmetros de regressão de potência.

Os dados de umidade volumétrica foram submetidos ao teste de normalidade, visando retirar dados que estivessem fora do padrão e que pudessem gerar erros de estimativa. Os dados estimados com as equações foram comparados com os dados de umidade observados, utilizando diagrama de dispersão e coeficiente de determinação (R^2).

4.6.Evapotranspiração de cultura por meio da sonda FDR

A determinação da evapotranspiração da cultura (ETc) foi feita por meio do balanço de água no solo, considerando um volume de controle que variou conforme a profundidade do sistema radicular, conferido a cada estação, por amostragem (Tabela 6).

Tabela 6: Profundidade efetiva do sistema radicular considerada no balanço volumétrico em cada ciclo produtivo.

Ciclos Produtivos	Profundidade efetiva (cm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1	60	60
2	60	60
3	60	60
4	60	60
5	60	60
6	60	60
7	60	60
8	30	50
9	30	50
10	30	50

Para calcular a evapotranspiração de cultura (ETc), a partir de medidas da sonda FDR, desconsiderou-se o escoamento superficial devido ao terreno ser plano (suave ondulado – I ≤ 0,06 m m^{-1}), tendo-se a seguinte fórmula de balanço hídrico (Equação 8).

$$\text{ETc (Diviner)} = I + P - \Delta arm \mp \Delta h \quad (8)$$

Em que:

ETc (Diviner) – Evapotranspiração de cultura pelo Diviner (mm);

Δarm – Variação de armazenamento de água no solo (mm);

I – Irrigação no período (mm);

P – Precipitação pluvial no período (mm); e

Δh – Lâmina que entra ou sai do contorno inferior (mm).

A variação de armazenamento foi feita por meio da diferença entre duas leituras subsequentes de umidade do solo (Equação 9), realizadas em intervalos de 4 dias em todos os ciclos e tratamentos. Para cálculo de variação do armazenamento de água no solo, utilizou-se a profundidade efetiva do sistema radicular (z) em cada ciclo nas respectivas parcelas (Tabela 5).

$$\Delta\text{arm} = \sum_{1=1}^{n}(\theta i - \theta f)\ z \quad (9)$$

Em que:

Δarm – variação de armazenamento (mm);

θi – leitura anterior da umidade (mm);

θf – leitura final da umidade (mm); e

z – profundidade efetiva da raiz durante os ciclos (4 dias).

Para determinação do fluxo de água no contorno inferior durante os intervalos de 4 dias, foi utilizada a equação de Darcy-Buckingham (Equação 10).

$$q = -K(\theta)\frac{\Delta\psi h}{Z} \quad (10)$$

Em que:

K(θ) – Condutividade hidráulica do solo não saturado em função do conteúdo de água, medido pela sonda FDR (mm dia^{-1});

Δψ h – Diferença do potencial hidráulico medido indiretamente pela sonda FDR (mca); e

z – Distância entre as profundidades analisadas para a movimentação de água no solo (0,20 m).

O fluxo foi considerado descendente quando q > 0 e ascendente quando q < 0. A Análise foi feita para as profundidades 10 centímetros acima e 10 centímetros abaixo da profundidade efetiva do sistema radicular (Tabela 5).

A condutividade hidráulica do solo não saturado foi determinada de acordo com as equação de Mualen (1976), a partir de parâmetros da curva de retenção de água no solo, apresentadas nas equações 11 e 12:

$$K(\theta) = Ko\, w^{L}\left[1-\left(1-w^{\frac{1}{m}}\right)^{m}\right]^{2} \qquad (11)$$

Em que:

K(θ) – Condutividade hidráulica do solo não saturado (mm dia^{-1});

Ko – Condutividade hidráulica do solo saturado (mm dia^{-1});

w – Saturação efetiva (adimensional);

L – Parâmetro empírico, cujo valor é igual 0,5 para a maioria dos solos; e

m – Parâmetro de regressão da equação da curva de retenção.

A descrição do método de obtenção da condutividade hidráulica saturada de cada camada do solo encontra-se no item 4.2.2.

A saturação efetiva (*w*) foi determinada por meio da equação 12:

$$w = \frac{\theta a - \theta r}{\theta s - \theta r} \qquad (12)$$

Em que:

w – saturação efetiva, ou conteúdo relativo de água no solo (adimensional);

θa – umidade atual do solo obtida por meio da leitura da sonda FDR ($cm^3\ cm^{-3}$);

θr – umidade residual do solo obtida por meio da curva de retenção ($cm^3 cm^{-3}$); e

θs – umidade de saturação do solo ($cm^3 cm^{-3}$).

Posteriormente foi determinado o potencial matricial da água do solo (ψ) pela equação de van Genutchen expressa na 13:

$$|\psi_m| = \frac{\left[\left(\frac{1}{w}\right)^{\frac{1}{m}} - 1\right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad (13)$$

Em que:

Ψ_m – Potencial matricial da água no solo (mca);

m, n e α – parâmetros de regressão da equação da curva de retenção (adimensional); e

w= saturação efetiva (adimensional).

Após a obtenção do potencial matricial, pode-se calcular o potencial hidráulico da água em cada profundidade estudada para determinar o fluxo de água no solo por meio da equação 14:

$$\psi_h = \psi_g + \psi_m \quad (14)$$

Em que:

Ψ_g – Potencial gravitacional, considerando uma camada de 0,10 m acima (+ 0,10) e 0,10 m abaixo (-0,10) da profundidade efetiva do sistema radicular, (mca);

Ψ_m – Potencial matricial (mca).

Para estimar o fluxo nos intervalos, foi feita a média da lâmina de água no contorno inferior obtida em cada leitura feita pela sonda FDR, conforme a equação 15:

$$\bar{q} = \left[\frac{(qi+qf)}{2}\right] * n \quad (15)$$

qi - Fluxo de água no contorno inferior inicial (mm dia^{-1});

qf – Fluxo de água no contorno inferior final (mm dia^{-1}); e

n – Número de dias de cada intervalo (4 dias).

4.7.Avaliação da profundidade efetiva do sistema radicular.

Foram coletadas amostras de solo estratificadas em meados ou no término de cada estação, sempre ao final de um determinado ciclo produtivo, visando obter dados do sistema radicular no ápice de seu desenvolvimento. As coletas foram realizadas nos finais dos respectivos ciclos produtivos (Tabela 7).

Tabela 7: Períodos de coleta do sistema radicular do capim Marandu exclusivo e consorciado. Piracicaba - SP. 2018.

Coletas	Datas
1	17/11/2017
2	18/03/2018
3	15/05/2018
4	12/08/2018

A amostragem foi feita por meio de tradagem, dispensando a necessidade de remoção de grandes volumes de terra, retirando-se pequenas amostras de solo sem destruição da área amostrada (FUJIWARA *et al*., 1994). As tradagens foram realizadas a cada 0,1 m de profundidade (4 repetições por camada) (Figura 8a), dentro de cada parcela experimental, com um trado coletor com diâmetro de 0,1 m de diâmetro, até a profundidade de 0,9 m (Figura 8b). As amostras de solo coletadas foram submersas em água com o intuito de facilitar o desprendimento do sistema radicular do solo (Figura 8c). Posteriormente, as raízes foram separadas por lavagem em água corrente (Figura 8d), utilizando-se uma peneira de 2,0 mm para retenção do sistema radicular (Figura 8e). Após a lavagem e separação, as amostras de raízes de cada camada foram acondicionadas em sacos de papel com auxílio de pinça (Figura 8f) e pesadas em balança de precisão (0,0005 g) para obtenção da massa da matéria fresca de raízes (Figura 8g). Em seguida, foram levadas a uma estufa de circulação forçada de ar, a 65ºC por 72 h. Após esse tempo, as amostras foram pesadas em balança de precisão (Figura 9h), obtendo-se a massa da matéria seca de cada profundidade, como proposto por Cecato *et al.* (2004). A partir daí, procedeu-se ao cálculo da percentagem de raízes em cada camada.

Figura 8: Etapas para obtenção da massa da matéria fresca e seca do sistema radicular do capim Marandu solteiro e consorciado, Piracicaba-SP, 2018.

Para avaliar a atividade do sistema radicular, o parâmetro utilizado foi estimar a porcentagem da extração de água do sistema radicular. Para tal, foi realizado um cálculo baseado na diferença do teor de água no solo (em mm) à cada 0,1 m de profundidade, até a camada aferida como zona efetiva radicular, em cada estação (vide Tabela 6). A porcentagem extraída foi baseada na razão da diferença de umidade à cada 04 (quatro) dias por camada e a somatória da diferença obtida em todas as profundidades.

4.8.Determinação de ETc por lisimetria de pesagem

Dois lisímetros de pesagem foram utilizados para determinação da ETc. Cada lisímetro é composto por uma caixa circular de PVC rígido, com diâmetro superior de 1,22 m, diâmetro inferior de 1,0 m, altura de 0,58 m e volume de 500 litros. Para sustentação do solo circundante, há paredes externas de alvenaria com tijolos comuns de espessura de 0,12 m. Ambos os lisímetros também possuem células de carga, sistema de pesagem e sistema de coleta de água e drenagem (Figura 9).

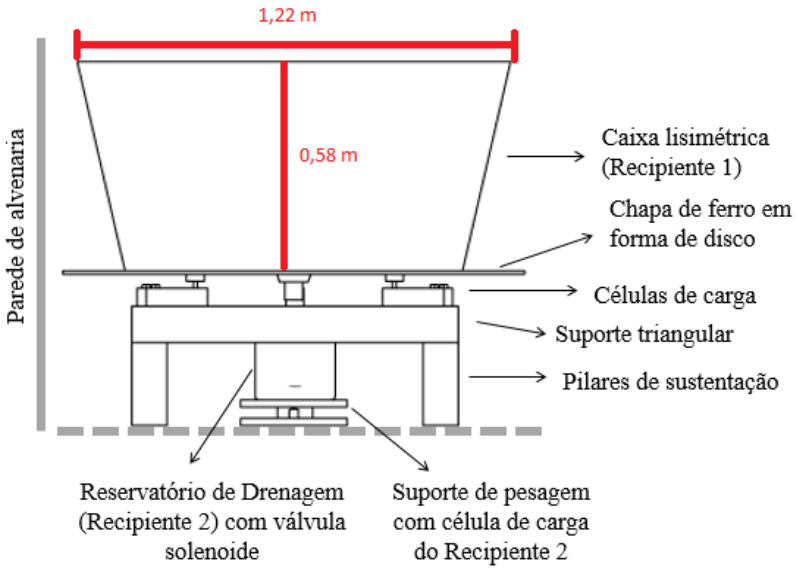

Figura 9: Corte transversal de um lisímetro de pesagem. Piracicaba/SP, 2017/18.

O sistema de pesagem foi composto por três células de carga dispostas em forma de triângulo equilátero com extremidades coincidentes com a borda da circunferência do lisímetro, conforme metodologia proposta por Righi (2004). As células de carga são da marca ALFA®, modelo I- do tipo Shear Bean, com capacidade nominal individual de 500 kg (capacidade total de 1500 kg). O sistema de drenagem foi composto por um dispositivo com célula de carga acionada automaticamente por uma válvula solenoide e um reservatório para coleta do volume drenado (Figura 10). A célula de carga utilizada também é da marca ALFA®, modelo GL30, com capacidade para 30 kg.

Para o auxílio de coleta e registro de dados de pesagem, foi utilizado um *datalloger* Campbell, modelo CR 1000. Os dados recebidos em milivolts (mV) foram calibrados para expressarem o peso em quilogramas. A calibração foi realizada de forma separada, conforme Campeche *et al.* (2011).

Figura 10: Sistema de pesagem e drenagem, registrado por Sanches (2017), Piracicaba-SP.

Foi feito um balanço de entradas e saídas de água nos lisímetros, a fim de estimar a evapotranspiração de cultura (ETc), utilizou-se a equação 16:

$$ETC = \Delta arm + P + I - \Delta dre \qquad (16)$$

Em que:

ETc – evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1});

V_{arm} – variação de armazenamento (mm dia^{-1});

P- precipitação (mm dia^{-1});

I – Irrigação (mm dia^{-1}); e

Δ_{dre} – Variação de drenagem (mm dia^{-1}).

Alguns critérios foram adotados seguindo metodologia proposta por Souza (2017), com intuito de se evitar valores superestimados de ETc, tais como a exclusão de dados em que o sentido do vento, que foram predominantemente de leste e noroeste, causasse alteração nas leituras, a contabilização de dados apenas durante o fotoperíodo e a exclusão de valores de ETc superiores a 0,25 mm em intervalos de 15 min. A exclusão de dados devido ao sentido do vento ocorreu porque tais dados acentuariam o efeito da advecção devido ao menor comprimento de bordadura deste lado na área experimental (Figura 1, parte superior), que é uma das fontes de

viés constatadas na lisimetria (PUTZ *et al*., 2018). O mesmo autor e Souza (2017) recomendam as demais ações para reduzir problemas com dados discrepantes.

4.9.Evapotranspiração de referência (ETo) e coeficiente de cultura (Kc)

A evapotranspiração de referência (ETo) foi obtida com de dados da estação meteorológica automática, situada próximo à área experimental. Foi calculada a partir da equação 17, de Penman–Monteith, proposta pela metodologia FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998):

$$ETo = \frac{0{,}408s(Sr - G) + \frac{\gamma 900 U_2 (es - ea)}{T + 273}}{s + \gamma(1 + 0{,}34U_2)} \quad (17)$$

Em que:

ETo - evapotranspiração de referência em mm.dia^{-1};

Sr - saldo de radiação em MJ.m^{-2}.dia^{-1};

G - fluxo de calor para o solo (MJ.m^{-2}.dia^{-1});

γ = 0,063 kPa.ºC^{-1} que é a constante psicrométrica;

U_2 - velocidade do vento a 2m de altura (m.s^{-1});

es - pressão de saturação de vapor (kPa);

ea - pressão atual de vapor (kPa);

T - temperatura do ar (ºC);e

s - taxa de variação da pressão de vapor em função da temperatura do ar (kPa.ºC^{-1}), determinada pela equação 18:

$$s = \frac{4098es}{(T + 237{,}3)^2} \quad (18)$$

Como os dados foram utilizados na escala horária, a equação 18 sofreu mudanças nos coeficientes do numerador (Cn = 37) e do denominador (Cd = 0,24 para Sr > 0 e 0,96 para Sr ≤ 0), conforme Allen *et al*. (2006), representada na equação 19:

$$ETo = \frac{0{,}408\, s\,(Sr - G) + \frac{\gamma\, Cn\, U2\, (es - ea)}{T + 273}}{s + \gamma\,(1 + Cd\, U2)} \quad (19)$$

O coeficiente de cultura foi calculado no intervalo de 4 dias a partir da somatória da evapotranspiração da cultura e dos valores obtidos somados da evapotranspiração de referência, conforme a equação 20:

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad (21)$$

Em que:

Kc – coeficiente de cultura (adimensional);

ETc – Evapotranspiração de cultura (mm 4 dias^{-1}); e

ETo – Evapotranspiração de referência (mm 4 dias^{-1}).

4.10. Parâmetros fitotécnicos e produtivos

Foram realizadas medições da altura do dossel forrageiro (ADF) a cada quatro dias, ao longo dos ciclos. Na mesma frequência de amostragem foram feitas leituras de interceptação luminosa (IL) e estimativas do índice de área foliar (IAF). A altura do dossel forrageiro foi obtida por meio de uma régua graduada em cm, medindo a altura da última folha expandida até o solo. O IAF e a IL da forrageira foram estimados por meio de um aparelho modelo LAI-2000 C Plant Canopy Analyzer (LI-COR®), em horários com pouca radiação solar, tal como citado por Sanches (2017) e Souza (2017).

O acúmulo de fitomassa foi obtido a cada final de ciclo, utilizando um quadro amostrador com área de 0,25 m^2 (0,5 m x 0,5 m). O quadro foi lançado aleatoriamente quatro (4) vezes em cada parcela, coletando-se a forragem presente em seu interior e mantendo-se uma altura pós-corte de 0,15m. Posteriormente, realizou-se a separação da forragem em matéria morta e viva, e estimou-se sua massa fresca e seca em (kg ha^{-1}). Nos ciclos com sobressemeadura separou-se a massa de matéria fresca do capim Marandu, do consórcio (aveia preta +azevém ou centeio + azevém) e a matéria morta.

Para determinação da massa da matéria seca (kg ha^{-1}), as amostras passaram por estufa de circulação forçada (72 horas a 65º C). Após esse procedimento, foram estimadas a Produção Total de Forragem (PTF), de aveia preta + azevém (PTAA), de centeio + azevém (PTCA) e a produção de capim Marandu (PTM).

Outro parâmetro produtivo determinado foi a produtividade de água (PA) em cada ciclo de crescimento, calculada a partir da PTF e da ETc determinada nos lisímetros, por meio da seguinte equação:

$$PA = \frac{PTF}{10(ETc)} \quad (21)$$

Em que:

PA – Produtividade de água, (kg m^3);

PTF – Produtividade Total de Forragem em cada ciclo, (kg ha^{-1} de matéria seca); e

ETc – Evapotranspiração de cultura determinada por meio de lisimetria de pesagem, em (mm $ciclo^{-1}$).

4.11. Parâmetros Estatísticos

A fim de avaliar o desempenho da sonda FDR para estimativa da ETc e do Kc, em comparação com dados obtidos por lisimetria, foram escolhidos quatro testes estatísticos quantitativos: índice de concordância (d), coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e erro médio absoluto (MAE).

O coeficiente de determinação (R^2) (Equação 23) descreve o grau de colinearidade entre os dados estimados e medidos. Este varia de 0 a 1, com os valores mais altos indicando menos variação de erro, sendo que valores maiores que 0,5 são geralmente considerados satisfatórios (SANTHI *et al*., 2001, VAN LIEW *et al*., 2003).

$$R^2 = \left[\frac{[\sum_{1=1}^{n}(Pi-P)\,(Ei-E)]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(|Pi-P|)^2}\right]\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(|Ei-P|)^2}}\right]^2 \quad (23)$$

Em que:

Ei – Valor estimado;

Pi – Valor padrão observado;

P – Média dos valores padrões observados; e

N- Número de amostragens.

O índice (d) de Willmott (1981), ou índice de concordância (d) (Equação 24) também assume o valor máximo de 1,0 quando a reta de regressão e a reta 1:1 são coincidentes. Com este teste estatístico, é possível notar diferenças aditivas e proporcionais entre variâncias observadas e simuladas. Este é, no entanto, extremamente sensível a valores extremos, tendo em vista que se trabalha com o quadrado das diferenças (LEGATES e MCCABE, 1999).

$$d = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^{n} (Ei - Pi)^2}{\sum_{i=1}^{n} (|Ei - P| + |Pi - P|)^2} \right| \quad (24)$$

A raiz quadrada do erro médio (RMSE, do Inglês *root mean square error*) (Equação 25) também é outro teste estatístico utilizado para avaliar se o modelo de regressão está satisfatório. Os cálculos avaliam a diferença do valor real e o valor previsto pelo modelo (SOUZA, 2018).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} (Pi - Ei)^2 \right]^{0,5} \quad (25)$$

O erro médio absoluto (AME, ou *main absolute error*) (Equação 26) mede o afastamento médio das previsões em relação aos valores observados, apresentando uma média do erro de previsão. Portanto, seu valor ideal seria o mais próximo de zero. O erro médio tende a ser pequeno se os erros positivos e negativos se compensarem (MENTZER e BIENSTOCK, 1998).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} |Pi - Ei| \quad (26)$$

Os dados referentes à produtividade total de forragem, produção de material morto, índice de área foliar, altura e produtividade de água, em cada ciclo, foram submetidos à analise de variância e ao teste F ($p \leq 0,05$) e quando significativas as médias foram comparadas por meio do Teste de Tukey ($p \leq 0,05$) com auxílio do software SISVAR (FERREIRA, 2008).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1.Calibração da sonda FDR

Os perfis de umidade volumétrica (θ) para cada profundidade nas três condições de umidade propostas (saturada, úmida e seca) são apresentados na Figura 11. A umidade variou de 0,21 cm^3 cm^{-3} na condição de solo seco e na profundidade 0,10 m, até 0,39 cm^3 cm^{-3} na condição de solo com umidade alta e na profundidade de 0,40 m.

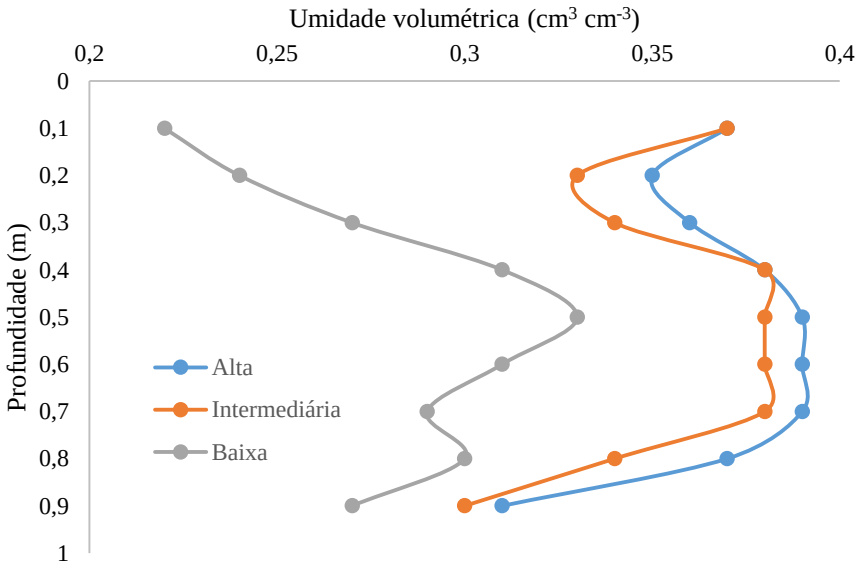

Figura 11: Umidade volumétrica em três condições de umidade (alta, intermediária e baixa) em um Nitossolo Vermelho eutroférrico latossólico, em Piracicaba-SP, 2018.

Ressalta-se a grande variação de umidade do solo em condição baixa (0,21 a 0,33 cm^3 cm^{-3}), devido às características físicas de cada camada. Os maiores valores de umidade volumétrica foram observados nas profundidades entre 0,40 m e 0,60 m, sendo explicados pelo elevado teor de argila (Tabela 2), alto valor de microporosidade, e baixos valores de condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 3). Estes fatores acarretam em maior retenção de água dessas camadas, pois o teor de argila e a percentagem de microporos estão relacionados a maiores valores de superfície específica das partículas do solo. Quanto maior a área superficial das partículas, maior é a tendência destas serem unidas e consequentemente, maior a capacidade de reter água (SAFADOUSTA *et al.*, 2014).

As leituras de escala de frequência para cada profundidade nas três condições de umidade propostas (alta, intermediária e baixa) são apresentadas na Figura 12. A variação na

frequência relativa foi de 0,64 na profundidade 0,10 m, na condição de solo seco, até 0,92 na profundidade 0,20 m, na condição de solo saturado.

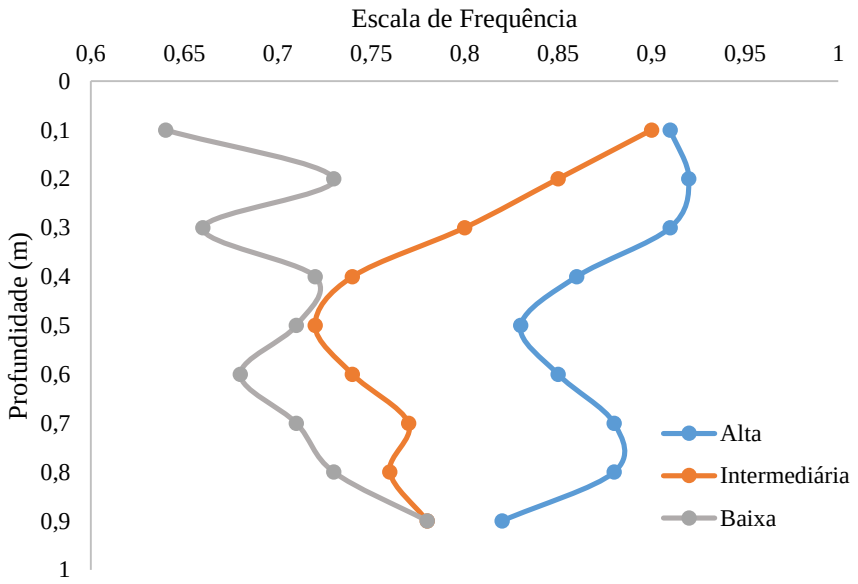

Figura 12: Escala de frequência em três condições de umidade (saturada, úmida e seca) no Nitossolo Vermelho eutroférrico latossólico, em Piracicaba-SP, 2018.

Houve diferenças em relação aos valores de FR, principalmente nas camadas abaixo de 0,40 m. As razões para essa variação também podem estar atreladas à física do solo, sendo que, a partir dessa profundidade, há uma porcentagem de argila entre 58% e 61%. Bohme *et al.* (2013) realizaram calibração de sonda FDR no Quênia, em solos com altas concentrações de argila (54% a 79%), e notaram que há uma correlação negativa entre o volume total de poros e o teor de umidade do solo. Huang *et al.* (2004) avaliaram uma sonda de capacitância em solo franco arenoso e detectaram valores superestimados em 0,047 $m^3\ m^{-3}$ em profundidades com maiores valores de densidade global do solo, que estão relacionados à compactação e à maior área superficial das partículas.

Podem ser notadas diferenças na densidade global das camadas do solo estudado (Figura 13). Os valores variaram entre 1,25 e 1,62 g cm^{-3}, sendo os perfis mais profundos menos densos que os perfis superficiais. Oliveira (2016) estudou a densidade global de um Latossolo Vermelho distroférrico até 1 metro de profundidade e notou uma redução nas camadas mais profundas, variando de 1,1 e 1,3 g cm^{-3}.

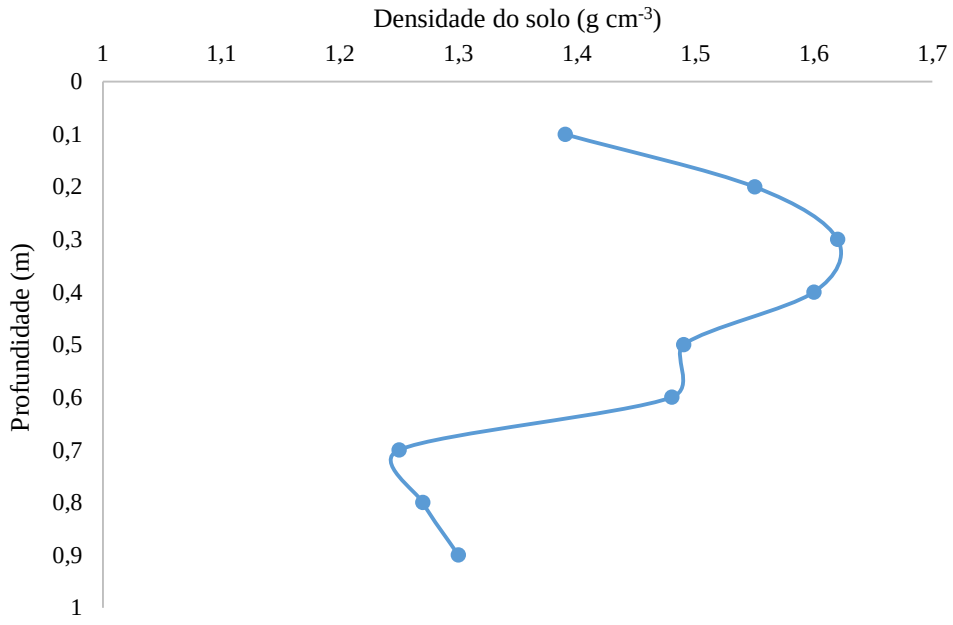

Figura 13: Densidade do solo (g/cm^{-3}) do Nitossolo Vermelho eutroférrico latossólico, em Piracicaba-SP, 2018.

A Tabela 8 contém as equações de calibração, o coeficiente de determinação, a raiz quadrada do erro médio (RMSE), e as umidades máximas e mínimas obtidas em cada profundidade para cada perfil do solo avaliado. A Figura 14, contém os gráficos dispersão por profundidade e em todo perfil do solo. Observam-se, nas primeiras camadas, altos valores de R^2, variando de 0,98 a 0,82, e RMSE de 0,009 e 0,019, nas camadas de 0-10 m e 0,2-0,3 m, respectivamente. Nas camadas a partir de 0,5 m, foi possível verificar menores coeficientes de determinação e maiores valores de erros, com R^2 variando de 0,80 a 0,70, e RMSE de 0,011 a 0,025 nas camadas de 0,4-0,5 m e 0,7-0,8 m, respectivamente.

Tabela 8: Equações de calibração e umidades mínimas e máximas por camada e para todo o perfil do solo (0-0,9 m).

Camadas (m)	Eq. de calibração	R^2	RMSE	$\theta_{mín}$ (cm^3cm^{-3})	$\theta_{máx}$ (cm^3cm^{-3})	N amostras
0-0,1	$\theta v= 0,4207 *FR^{1,4377}$	0,98	0,009	0,21	0,37	6
0,1-0,2	$\theta v= 0,4025 *FR^{1,4975}$	0,87	0,017	0,23	0,35	6
0,2-0,3	$\theta v= 0,4034* FR^{0,9132}$	0,82	0,019	0,26	0,38	6
0,3-0,4	$\theta v= 0,4402*FR^{1,0335}$	0,88	0,012	0,3	0,39	4
0,4-0,5	$\theta v=0,4118*FR^{0,2563}$	0,8	0,011	0,32	0,38	4
0,5-0,6	$\theta v=0,475*FR^{1,04}$	0,78	0,018	0,3	0,38	4
0,6-0,7	$\theta v=0,4239*FR^{0,8381}$	0,73	0,016	0,31	0,37	4
0,7-0,8	$\theta v=0,445*FR^{1,3891}$	0,7	0,025	0,26	0,37	4
0,8-0,9	$\theta v=0,5004*FR^{1,3137}$	0,79	0,019	0,27	0,37	4
0-0,9	$\theta v =0,4067*FR^{0,9287}$	0,64	0,025	0,21	0,39	42

θv = umidade volumétrica ou conteúdo de água no solo, FR = frequência relativa.

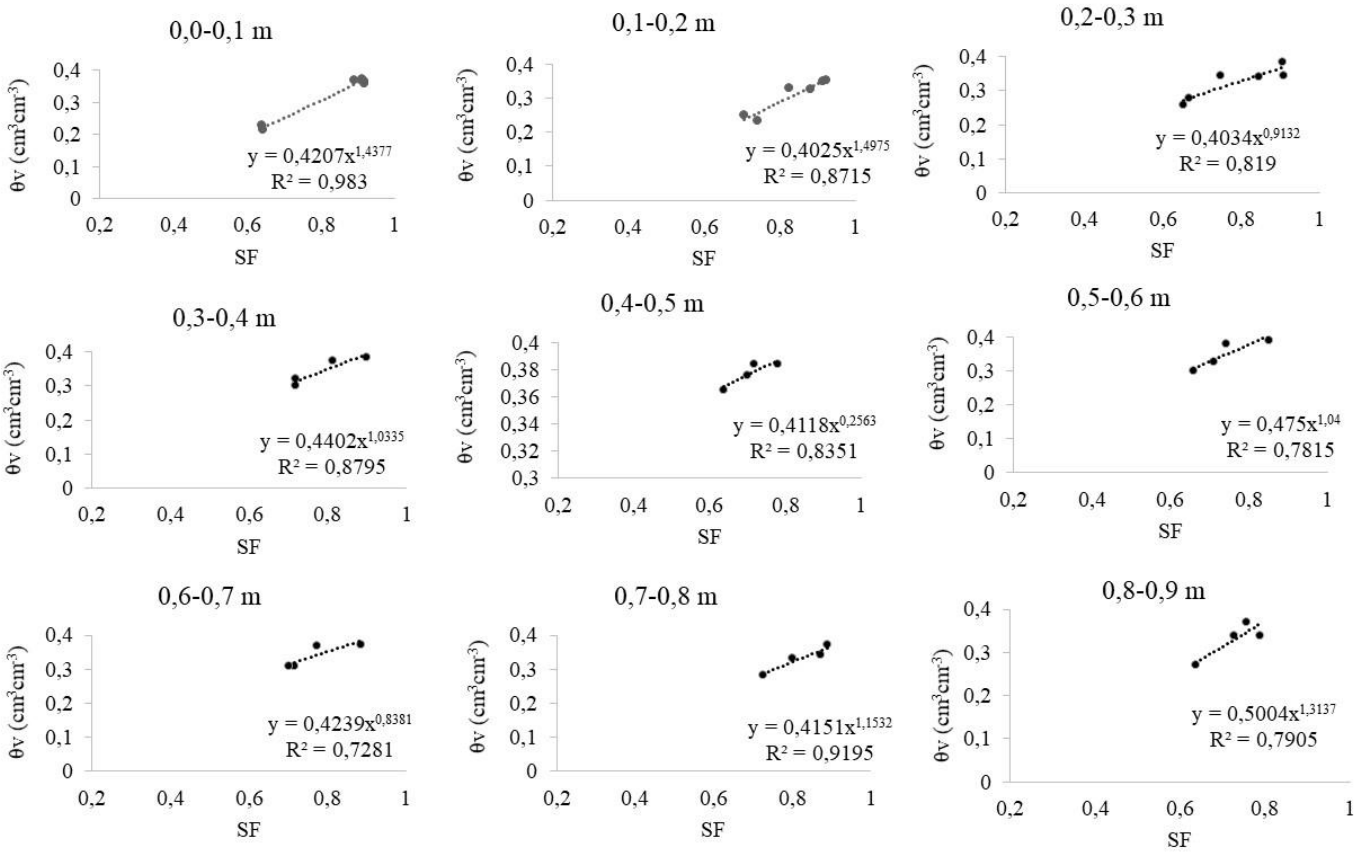

Figura 14: Gráficos de dispersão por camada, Piracicaba/SP, 2018.

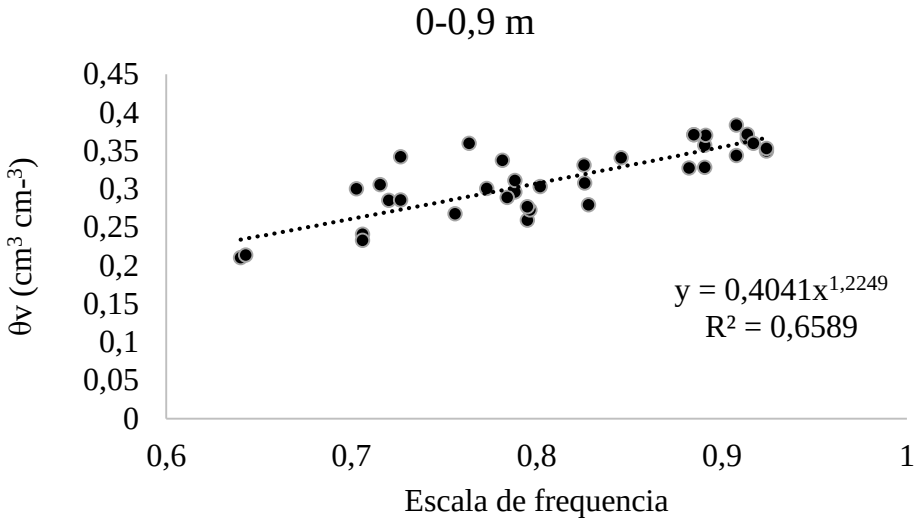

Figura 15: Grafico de dispersão de todo perfil do solo (0-0,9 m), Piracicaba/SP, 2018.

O aumento do erro e a diminuição dos valores de R^2 também foram constatados por Haberland *et al.* (2015), que realizaram calibração específica para cada profundidade até 0,6 m, a fim de estimar o conteúdo de água no solo por meio de sonda FDR Diviner 2000 em um vinhedo na região de O'Higgins, no Chile. Os valores de R^2 e RMSE decresceram em maiores profundidades, apresentando uma variação do R^2 de 0,93 a 0,59 e RMSE de 0,017 a 0,078, nas camadas de 0-0,1 m e 0,5-0,6 m, respectivamente.

Oliveira (2016) realizou calibração de sonda FDR *EnviroSCAN* em um Latossolo Vermelho distroférrico na região de Campinas-SP, e também notou menores valores de R^2 em camadas mais profundas, de R^2 = 0,91 para 0,67 nas profundidades de 0,4 m e 0,8 m, respectivamente. O autor também observou que a calibração por camada resultou em valores superiores de R^2 em relação à calibração única para todo o perfil do solo, cujo coeficiente de determinação foi de apenas 0,60, próximo do valor determinado no presente experimento (R^2 = 0,64).

A heterogeneidade da densidade do solo em camadas mais profundas pode ser uma fonte de erro na escala de frequência de sondas capacitivas, devido à diferença na quantidade de material sólido, podendo interferir na frequência captada pelo sensor, devido à alteração da constante dielétrica do solo. Schwartz *et al.* (2014) trabalharam com sonda TDR automatizada e constataram variação das características físicas do solo, que exerce influência na mensuração indireta da sonda. Os autores recomendaram a necessidade de se obter equações de calibração específicas para cada profundidade, quando houver heterogeneidade no perfil do solo.

Outra possível fonte de viés é o alto teor de óxido de ferro presente em solos intemperizados como o Nitossolo, que influencia os atributos eletroquímicos do solo (ALLEONI e CAMARGO 1994). Kayzer *et al.* (2010) realizaram um estudo visando estabelecer modelos matemáticos de correlação entre umidade e constante dielétrica em um Argissolo, em dois Latossolos e em um Nitossolo, com base em estimativas de umidade obtidas por sonda TDR. Os autores verificaram a necessidade de calibrações específicas para cada tipo desses solos intemperizados, devido aos maiores teores de óxidos de ferro em suas composições.

Diante do exposto neste item, pode-se afirmar que, em experimentos para estimativa de coeficientes de cultura (Kc), é fundamental que se faça a calibração de equações por camada de solo, a fim de minimizar erros de leitura da umidade do solo e, consequentemente, de interpretação do consumo de água das culturas.

5.2. ETc e Kc determinado por lisimetria de pesagem e sonda FDR para o capim Marandu solteiro no período de primavera e verão.

Durante os sete ciclos produtivos de primavera, verão e parte do outono, a ETo acumulada foi de 645,5 mm (Figura 16) no período de 196 dias (média de 3,29 mm dia^{-1}). Nesse período a precipitação foi de 819,6 mm e o suprimento por irrigação foi de 210,6 mm. No balanço hídrico estimado com o auxílio da sonda FDR obteve-se uma ETc acumulada de 590,08 mm (média de 3,09 mm dia^{-1}), enquanto a ETc determinado por meio de lisimetria de pesagem foi de 520,16 mm (média de 2,70 mm dia^{-1}). Barbosa *et al*., (2016) estudaram o consumo de água de capim Tifton 85 na região de Montes Claros, MG, e estimaram a ETc diária em 3,62 mm dia^{-1}, por meio de balanço hídrico com utilização de tensiômetros. O valor é próximo ao encontrado neste trabalho.

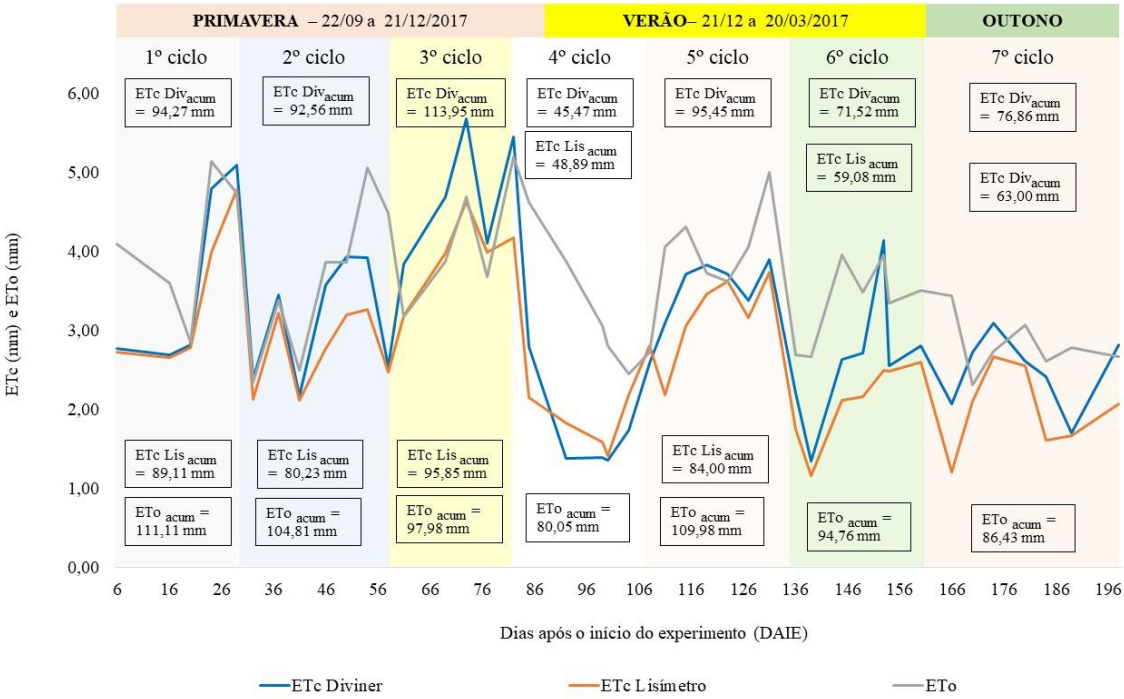

Figura 16: Valores médios de ETc e ETo (mm dia^{-1}) para o capim Marandu em cultivo solteiro, nos ciclos ocorrido durante o período primavera/verão, Piracicaba/SP, 2018. Legenda: ETc Div $_{acum}$ = evapotranspiração de cultura estimada com auxílio da sonda Diviner acumulada no ciclo, ETc Lis $_{acum}$ = evapotranspiração de cultura estimada com lisimetro de pesagem acumulada no ciclo, ETo $_{acum}$ = evapotranspiração de referência acumulada no ciclo.

O detalhamento do balanço hídrico pela técnica capacitiva pode ser observado na Tabela 9, em que se tem todos componentes do ciclo 2, para estimativa da ETc.

Tabela 9: Valores dos componentes do balanço hídrico durante o ciclo 2, Piracicaba/SP, 2018.

Intervalos	Drenagem profunda (mm)	Ascenção capilar (mm)	Irrigação (mm)	Precipitação pluvial (mm)	Δarm (mm)	ETc acum (mm)
28-32	9,26	---	14,98	8,07	4,63	9,16
32-36	16,08	---	---	34,92	1,60	17,29
36-40	3,67	---	---	10,76	-1,60	8,69
40-44	57,91	---	14,98	64,58	3,74	17,91
44-48	---	11,85	---	2,34	-1,58	15,76
48-52	12,95	---	14,98	15,68	2,05	15,66
52-56	---	2,49	---	---	5,14	7,63

Os valores de Kc estimados pelo balanço hídrico com o método de capacitância superestimou o de lisimetria na maior parte dos sete ciclos produtivos (Figura 17). No período primavera verão e início do outono, o Kc variou de 0,35 a 1,09 quando determinado por meio do lisímetro de pesagem, e de 0,36 a 1,21 na estimativa pela sonda FDR. Os valores convergem com os de Souza (2017), que determinou Kc de capim Marandu solteiro, por meio de lisimetria de pesagem, em Piracicaba/SP, encontrando valores entre 0,35 e 1,49, nas mesmas estações do ano.

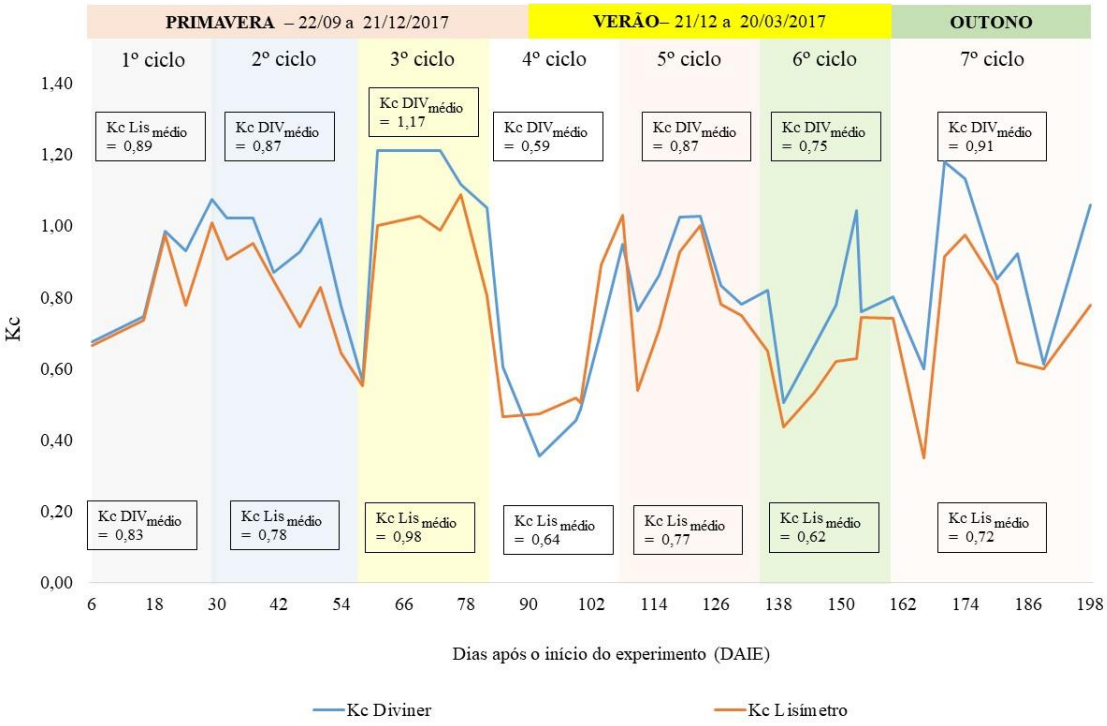

Figura 17: Valores de Kc estimados a cada ciclo para o capim Marandu solteiro, no período primavera/verão, Piracicaba/SP, 2018. Kc Div $_{\text{médio}}$ = coeficiente de cultura médio estimado pela sonda Diviner no ciclo, Kc Lis $_{\text{médio}}$ = coeficiente de cultura médio estimado por lisimetria.

A observação da evolução do Kc na maioria dos ciclos, e considerando ambos os métodos, mostra uma tendência de crescimento ao longo do ciclo e queda acentuada próxima ao momento de corte. Rodrigues *et al*. (2011) também observaram um rápido crescimento do Kc em capim Tanzânia até o 23º dia do ciclo e o declínio a partir desse momento, em ciclos de 35 dias. Segundo os autores, os valores de Kc situaram-se entre 0,50 no início dos ciclos, 1,40 em momentos de pico, e 0,70 no fim dos ciclos. No presente trabalho, também se verificou

valores entre 0,58 e 0,60, no começo e no fim do ciclo, respectivamente, e valores entre 1,12 e 1,21 no momento de máximo crescimento

No quarto e no sexto ciclo houve problema de vazamento no sistema de irrigação, prejudicando a reposição hídrica. Nesse ciclo a cultura sofreu estresse por déficit hídrico, ocasionando uma redução brusca nos valores de Kc estimados, quando comparado aos demais ciclos.

5.3. ETc e Kc determinados por lisimetria de pesagem e sonda FDR para o capim Marandu sobressemeado com forrageiras de inverno

As médias diárias de ETc, bem como a ETc acumulada em cada ciclo, podem ser observadas na Figura 18. Durante o experimento com o capim Marandu consorciado com aveia preta + azevém, no período de outono/inverno, obteve-se uma ETc acumulada de 279,87 mm com o método da lisimetria, e de 306,61 mm com a sonda FDR. Durante esse período, a ETc média estimada pela sonda FDR superestimou a determinada pelo método da lisimetria , com valores de 2,63 e 2,50 mm dia^{-1}, respectivamente. Os valores acumulados estão próximos do encontrado por Saldias *et al*. (2018) que estimaram a evapotranspiração das culturas de aveia preta e trigo na região central do Chile, por meio de balanço hídrico e monitoramento da umidade com sonda de nêutrons. Os autores obtiveram uma ETc acumulada de 300 mm a cada 4 meses de ciclo, na média dos três anos de experimento.

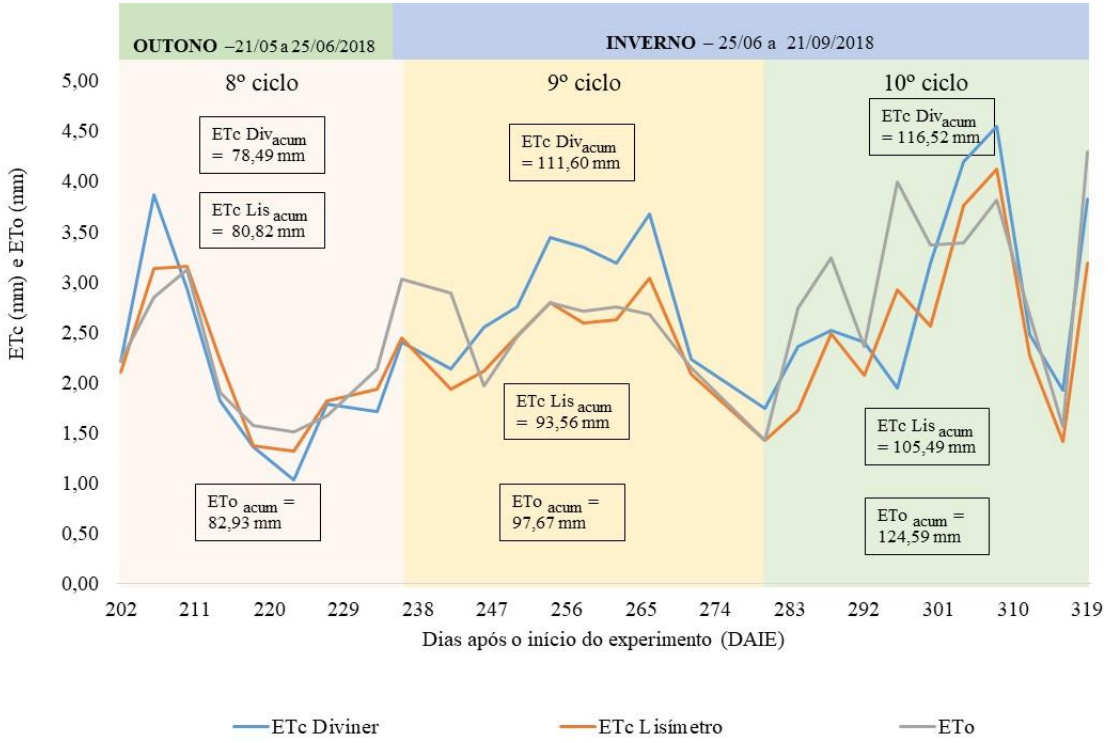

Figura 18: Valores médios de ETc e ETo (mm dia^{-1}) para o capim Marandu sobressemeado com aveia preta + azevém, nos ciclos ocorridos durante o período outono/inverno, Piracicaba/SP, 2018. Legenda: ETc Div_{acum} = evapotranspiração de cultura estimada com auxílio da sonda Diviner, ETc Lis_{acum} = evapotranspiração de cultura estimada por lisimetria de pesagem e ETo_{acum} = evapotranspiração de referência acumulada no ciclo.

Os valores de Kc obtidos com a sonda FDR foram superestimados em relação aos obtidos a partir da lisimetria, em dois dos três ciclos produtivos (Figura 19). No período de inverno, variaram de 0,63 a 1,17 pelo método de lisimetria, e de 0,49 a 1,37 pelo método de capacitância. Souza (2017) determinou Kc por meio de lisímetros de pesagem em capim Marandu sobressemeado com aveia preta e azevém, e encontrou valores entre 0,87 e 1,51. Tais valores são superiores, porém, próximos aos encontrados neste trabalho; possivelmente, as diferenças são explicadas por diferenças de temperatura entre os dois períodos de inverno.

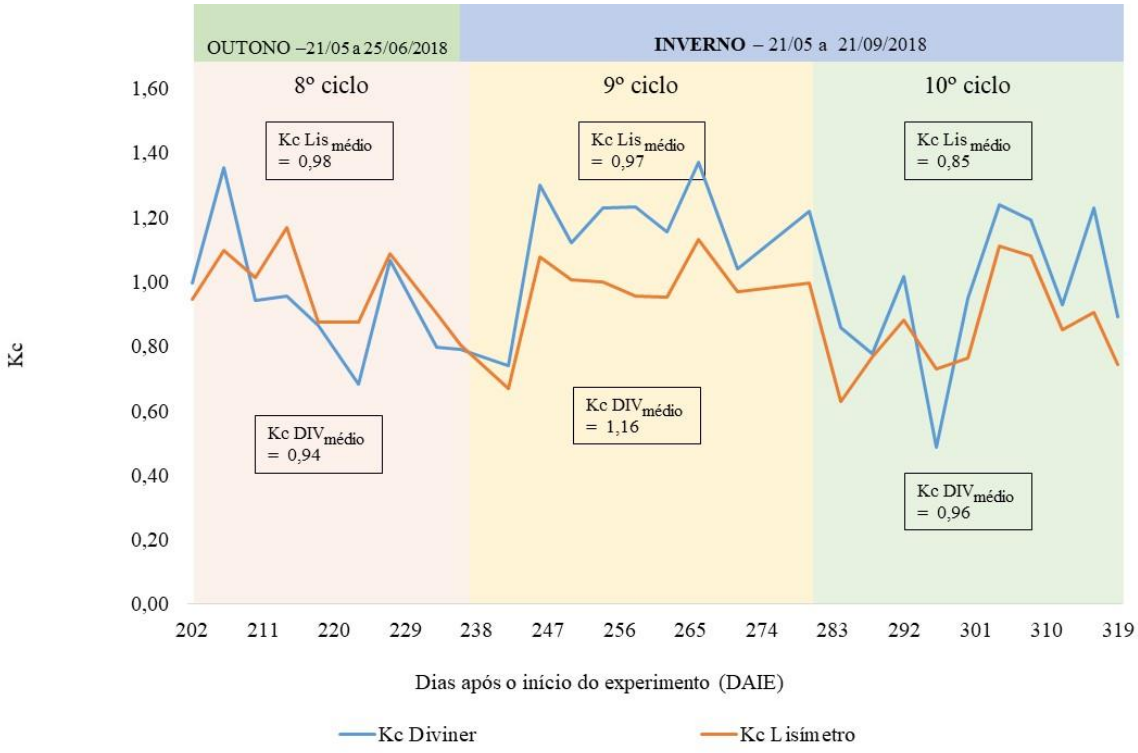

Figura 19: Valores de Kc estimados a cada ciclo para o capim Marandu sobressemeado com aveia preta + azevém, no período outono/inverno, Piracicaba/SP, 2018. Kc $Div_{médio}$ = coeficiente de cultura médio estimado pela sonda Diviner no ciclo, Kc $Lis_{médio}$ = coeficiente de cultura estimado por lisimetria de pesagem a cada ciclo.

Sanches (2017) determinou valores de Kc em capim Mombaça sobressemeado com aveia preta e azevém, em Piracicaba/SP, e obteve valores entre 1,18 e 1,02. O maior valor verificado pelo autor ocorreu em ciclos no meio do período outono/inverno, tal como observado neste trabalho.

No 9º ciclo ocorreram maiores valores de Kc estimados a partir da sonda FDR, em relação à lisimetria. Neste ciclo obteve-se a maior produção de matéria seca de aveia preta no período outono /inverno, com 1908,20 kg ha^{-1} de MS. Oliveira *et al.* (2013) também trabalharam com a sonda FDR Diviner® para estimativa de Kc em feijão caupi, em Teresina/PI, e observaram resultados semelhantes. O Kc foi maior em um período de alta produtividade, na fase reprodutiva da cultura, em que foi observado um consumo 13% superior à ETo (Kc = 1,13).

No 10º ciclo houve uma diminuição dos valores de Kc, quando comparado aos demais ciclos. Uma das hipóteses aventadas para este evento seria o desacoplamento entre o dossel forrageiro e a atmosfera, que pode ocorrer quando se tem uma elevada ETo e a ETc não acompanha tal elevação devido a mecanismos de resistência estomática da planta (MARIN *et al.*, 2016). Este fenômeno também foi verificado por Meirelles *et al.* (2011) quando observaram

que um dos fatores que interferem na evapotranspiração do capim Marandu foi o acoplamento da copa da planta com a atmosfera. No momento de maior ápice constatado pela evapotranspiração de referência (4,00 mm dia^{-1}), o índice de área foliar da cultura era de 2,01.

Tendo em vista que a estação do ano do ocorrido era o inverno, quando há um menor fotoperíodo, talvez exista um mecanismo da planta que evitou uma perda maior de água, obtendo um Kc baixo. Nesse período a forrageira direciona seus fotoassimilados para a fase reprodutiva do ciclo (produção de sementes), e há mecanismos fisiológicos de redução da produção de folhas (LEMAIRE E CHAPMAN 1996).

Os valores de ETc média diária e ETc acumulada em cada ciclo podem ser observados na Figura 20. Durante o experimento do capim Marandu consorciado com centeio + azevém, a ETc acumulada neste período foi de 300,28 mm, determinado com o lisímetro de pesagem, e de 347,60 mm quando estimado com a sonda FDR. Assim como no consórcio de capim Marandu com aveia preta e azevém, a ETc média obtida pela sonda FDR superestimou os valores encontrados pelo método da lisimetria sendo de 2,96 e 2,54 mm dia^{-1}, respectivamente.

Na comparação entre os consórcios, capim Marandu + centeio + azevém foi o que apresentou maior consumo de água no período outono/inverno. Abraha e Savage (2008) estimaram o consumo hídrico de aveia preta e centeio no período outono/inverno, por meio do modelo Crop Syst, na África do Sul, e encontraram maior ETc acumulada no centeio (159,59 mm e 157,25 mm para centeio e aveia, respectivamente). Qi e Helmers (2010) utilizaram lisimetria para estudar o consumo de água do centeio em cultivo solteiro no estado de Iowa (EUA), e obtiveram uma ETc média diária de 2,4 mm dia^{-1}, valor semelhante ao encontrado no presente trabalho (2,64 mm dia^{-1}), porém em consórcio com capim Marandu e azevém. A pequena diferença entre os valores citados pode indicar uma competição entre as espécies forrageiras, reduzindo o desempenho individual de cada uma.

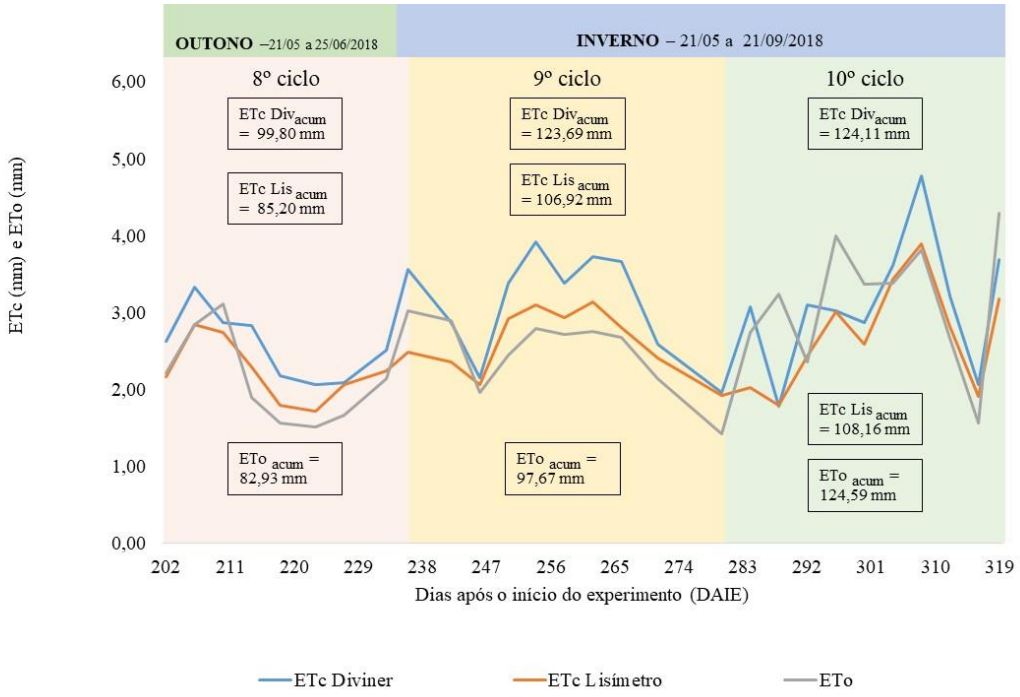

Figura 20: Valores de ETc e ETo para o capim Marandu sobressemeado com centeio + azevém, no período outono/inverno, Piracicaba/SP, 2018. Legenda: ETc Div_{acum} = Evapotranspiração de cultura estimada pela sonda Diviner acumulada no ciclo, ETc Lis_{acum} = Evapotranspiração de cultura estimada por Lisimetria acumulada no ciclo e ETo_{acum} = evapotranspiração de referência acumulada no ciclo.

Os valores de Kc obtidos a partir da sonda FDR foram maiores que os obtidos por lisimetria em partes de todos os ciclos (Figura 21). Na literatura científica não foram encontrados valores de Kc para o centeio. A título de referência, há trabalhos com determinação de Kc para cultura do trigo (GAO *et al.*, 2014), que tem porte semelhante à cultura do centeio. Os autores obtiveram valores de Kc que variaram de 0,35 a 0,8 para o período inicial, 1,01 a 1,04 para o meio do ciclo, e de 0,53 a 0,98 para o final de ciclo. Os valores são próximos aos apresentados no presente trabalho com consórcio.

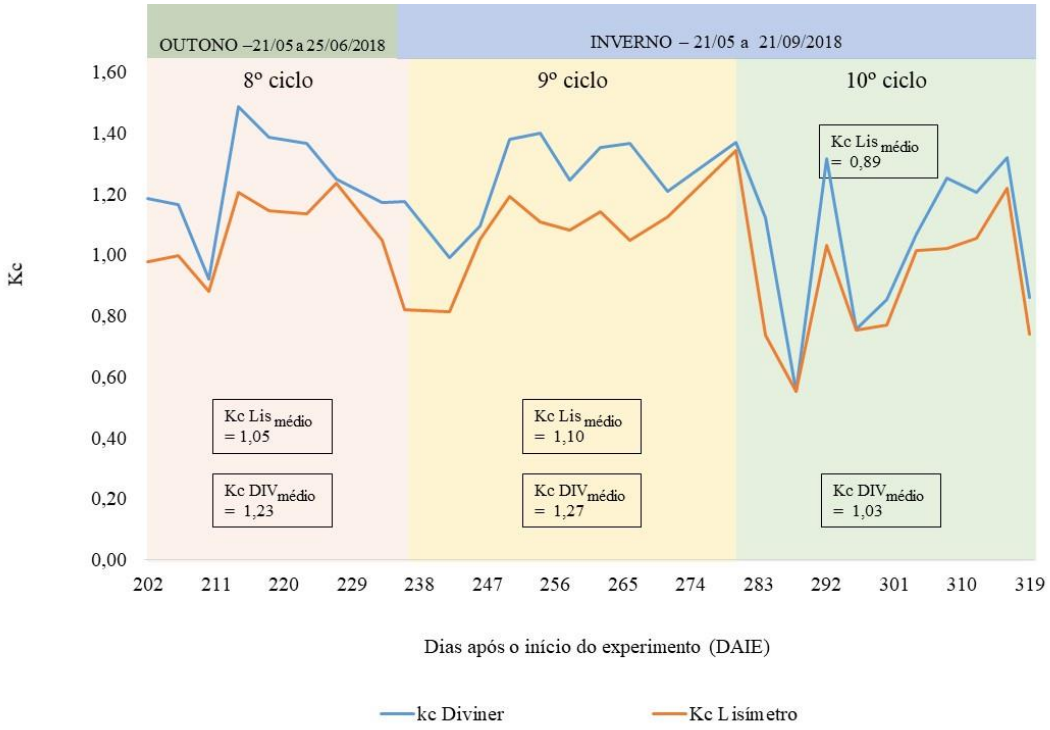

Figura 21: Valores de Kc para o capim Marandu sobressemeado com centeio + azevém, no período outono/inverno, Piracicaba/SP, 2018. Kc Div $_{\text{médio}}$ = coeficiente de cultura médio estimado pela sonda Diviner no ciclo, Kc Lis $_{\text{médio}}$ = coeficiente de cultura médio estimado por lisimetria no ciclo.

No início do 10º ciclo a estimativa de ETc e de Kc com o método de capacitância forneceu valores maiores que os do método da lisimetria, o que pode ser decorrente de erro de estimativa causados por um período de precipitação intensa. Nesses períodos aumenta a intensidade do escoamento superficial, o que não foi computado neste experimento. O escoamento superficial não afeta as estimativas de ETc na lisimetria, pois considera-se apenas as diferenças de peso e a medição de água drenada nos lisímetros. No método de capacitância, tais fluxos são estimados e na lisimetria de pesagem, medidos. Os valores de Kc variaram entre 0,69 e 1,34, sendo o maior coeficiente constatado em um período em que houve uma precipitação pluvial de 80,5 mm em 4 dias (cerca de 20 mm dia^{-1}), no qual pode ter havido superestimativa de ETc. Clothier *et al*. (2009), explicam que o excesso de água e um possível escoamento superficial podem aumentar artificialmente o uso aparente de água pelo dossel, superestimando valores de Kc.

5.4. Correlações de ETc e Kc entre Sonda FDR e Lisímetro de Pesagem

Na Tabela 10 são apresentados os índices estatísticos para análise de correlações entre os dados de ETc obtidos a partir de lisimetria e da sonda FDR. Na Figura 22 são apresentados os gráficos de dispersão de cada cultivo. Em todos tratamentos obtiveram-se regressões lineares com altos coeficientes de determinação (R^2), abrangendo todos os ciclos produtivos e nas estações do ano correspondentes a cada tratamento, com baixos valores de erros.

Tabela 10: Índices estatísticos para comparação da ETc estimada pela sonda FDR e pelo lisímetro de pesagem. Piracicaba/SP, 2018.

Cultivos	ETc Diviner e ETc Lisímetro					
	Equação	d	R2	ME	MAE	RMSE
MS	ETc Lis = 0,9156 ETc Div + 0,1985	0,91	0,85	0,389	0,452	0,584
MAA	ETc Lis = 0,7098 ETc Div + 0,5326	0,91	0,80	0,230	0,388	0,461
MCA	ETc Lis = 0,7032 ETc Div + 0,4576	0,84	0,83	0,422	0,423	0,521

Legenda: MS - Marandu Solteiro; MAA - Marandu + Aveia Preta + Azevém; MCA - Marandu + Centeio + Azevém; R^2 - coeficiente de determinação; d - índice de Willmott, ME - erro médio; MAE - erro médio absoluto; e RMSE - raiz do erro do quadrado médio.

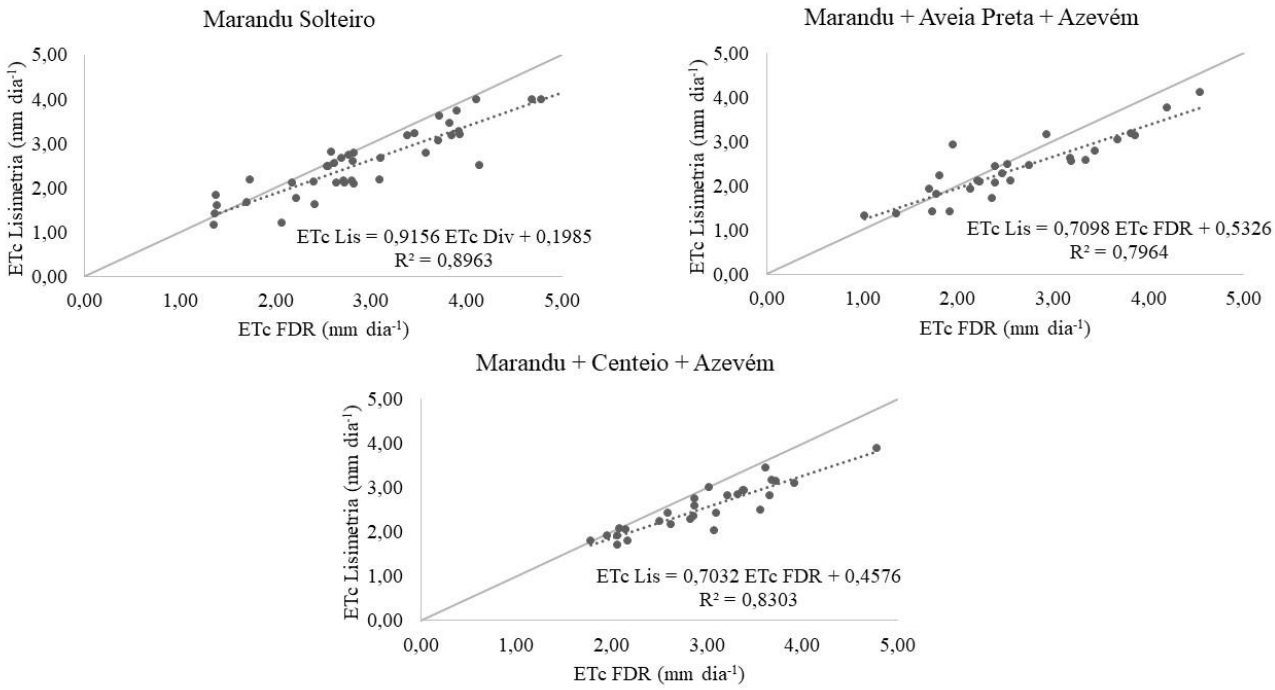

Figura 22: Gráficos de dispersão para comparação da ETc estimada pela sonda FDR e pelo lisimetro de pesagem em diferentes cultivos. Piracicaba/SP, 2018.

Nota-se que não houve grande diferença dos índices estatísticos entre os tratamentos estudados, evidenciando baixos erros e altos coeficientes de determinação, e um elevado valor no índice de Willmott. As possíveis razões para as altas correlações obtidas são a calibração específica das equações da sonda FDR para cada profundidade, a determinação da profundidade efetiva do sistema radicular e a determinação de fluxos ascendentes e descendentes de água na zona-limite do sistema radicular.

A determinação da profundidade efetiva do sistema radicular permitiu a estimativa da atividade de absorção de água pelas raízes nas diferentes camadas, de modo que o balanço hídrico foi realizado na camada de solo em que houve variação de umidade causada pelas raízes. A determinação de fluxos ascendentes e descendentes é importante porque permite descontar saídas e incluir entradas de água no limite entre a zona de raízes e as camadas inferiores do solo.

Primo (2013) trabalhou com sonda FDR (Diviner 2000) para estimar a ETc de palma forrageira na região de Serra Talhada-PE, por meio de balanço hídrico. O autor obteve valores de fluxos descendentes e ascendentes utilizando a equação de Darcy-Buckingham, com os quais estimou o consumo hídrico em 1170 mm (499 dias de experimento) e média de 2,22 mm dia^{-1}. Este autor incluiu a determinação do escoamento superficial em seu método de trabalho devido à alta declividade da área experimental, diferentemente do caso do presente trabalho (declividade inferior a 4%).

Os valores de coeficiente de determinação apresentados no presente trabalho estão condizentes com Souza *et al*. (2013), que também obtiveram coeficientes R^2 acima de 0,9 com solos de textura de média a argilosa.

Em todos os tratamentos também foram observados altos coeficientes de correlação para Kc, abrangendo todos os ciclos produtivos nas correspondentes estações do ano, apresentando bons índices estatísticos e baixos erros; porém, com desempenho inferior ao obtido nas estimativas de ETc (Tabela 11 e Figura 23).

Tabela 11: Índices estatísticos demonstrados para Kc estimado com sonda FDR e com lisímetro de pesagem. Piracicaba/SP, 2018.

Cultivos	Kc Diviner e Kc Lisímetro					
	Equação	d	R2	ME	MAE	RMSE
MS	Kc Lis = 0,7276 Kc Div + 0,1304	0,85	0,70	0,104	0,126	0,159
MAA	Kc Lis = 0,4771 Kc Div - 0,444	0,75	0,53	0,087	0,149	0,174
MCA	Kc Lis = 0,728 Kc Div + 0,1555	0,79	0,75	0,163	0,164	0,196

Legenda: Marandu Solteiro (MS), Marandu + Aveia Preta + Azevém (MAA), Marandu + Centeio + Azevém (MCA), coeficientes de determinação (R^2), índice de Willmott (d), Erro médio (ME), Erro médio absoluto (MAE) e Raiz do erro do Quadrado médio (RMSE).

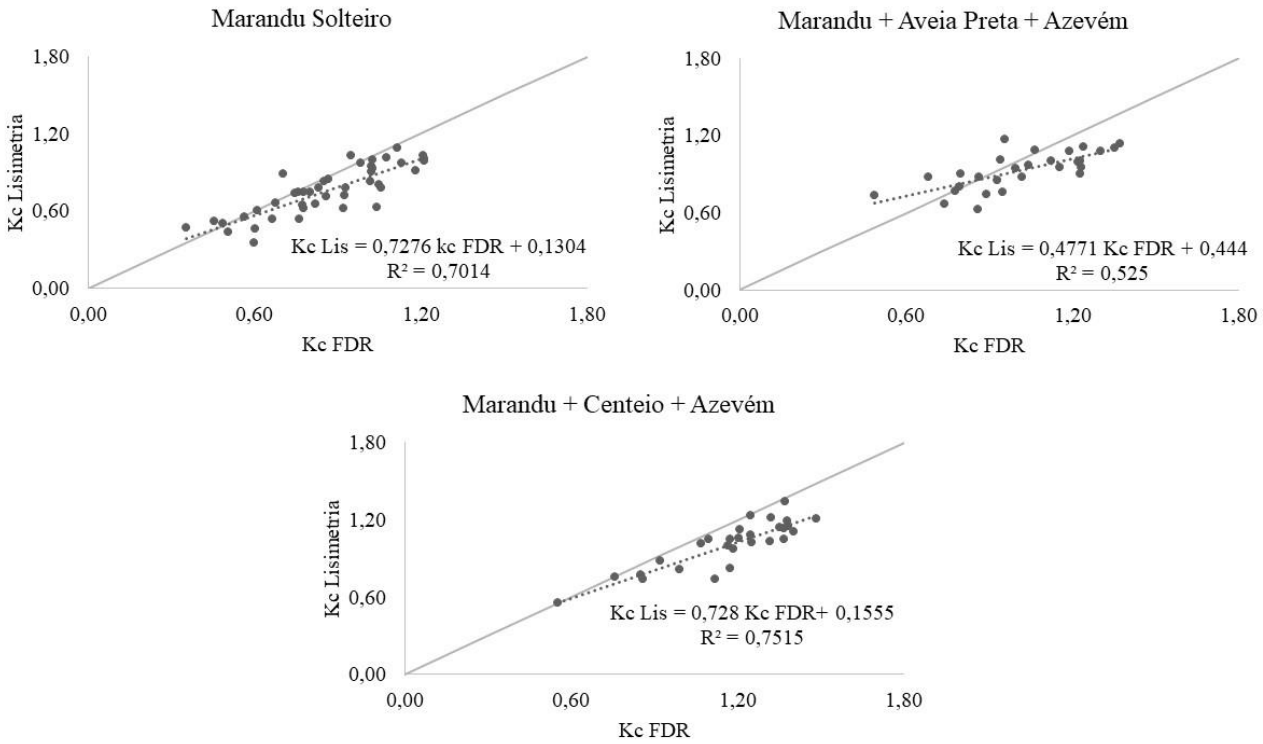

Figura 23: Gráficos de dispersão para comparação de Kc estimado pela sonda FDR e pelo lisimetro de pesagem em diferentes cultivos. Piracicaba/SP, 2018.

Uma das razões para o Kc ter índices estatísticos menores que a ETc é a possibilidade de efeito do escoamento superficial na estimativa de ETc com o método de capacitância (sonda FDR). Possivelmente, a ausência de medição de tal escoamento pode ter causado a superestimativa de ETc e Kc, ocorrida em alguns ciclos. Portanto, o método de estimativa com sonda FDR pode ter limitações de uso em tais estimativas. Outro fator que pode ter influenciado os resultados é a mudança na profundidade efetiva do sistema radicular após a sobressemeadura, tendo em vista que houve uma concentração maior das raízes nas primeiras camadas do solo,

em comparação ao período de primavera/verão. Evett *et al.* (2006) destacam que o crescimento da zona radicular da cultura pode influenciar e modificar a densidade do solo e, consequentemente, o armazenamento de água na camada correspondente. Assim, a curva de retenção utilizada na calibração da sonda FDR pode sofrer modificações e causar aumento do erro de estimativa da umidade do solo.

Outro fator de erro inerente ao método de capacitância é o teor de argila e de óxidos de ferro presentes no solo. Bohme *et al.* (2013) trabalharam em solos com teores de argila semelhantes aos do solo deste experimento (54% e 79%) e notaram uma queda no coeficiente de determinação ao passo em que aumentava a profundidade. O último fator de erro refere-se a problemas de instalação e defeitos do tubo de acesso, que afetam seu contato com o solo, incluindo o ângulo de inserção do tubo no solo (CURTO *et al*., 2016). Se não for instalado perfeitamente na vertical, a profundidade de leitura não será igual à registrada na sonda. Isto provavelmente não ocorreu no presente experimento, mas foram observadas inconsistências em leituras realizadas com a sonda FDR no período imediatamente após a instalação dos tubos de acesso, indicando que as leituras devem ocorrer após um período de acomodação dos tubos no solo, para reduzir erros de estimativa.

Algumas formas de minimizar tais influências e que geram bons resultados nos índices estatísticos são ligadas à calibração específica por camada, à detecção da atividade radicular de absorção de água no perfil do solo e à quantificação de fluxos de água por ascensão capilar ou drenagem. Tais cuidados viabilizam a utilização da sonda FDR para estimativas de ETc e Kc. Quanto aos problemas de instalação, é necessário treinamento específico e atenção.

5.5. Profundidade efetiva e atividade de raízes

Os resultados das análises de densidade do sistema radicular e porcentagem de raízes nas camadas do solo são apresentados a seguir. A porcentagem de raízes por camada, e a percentagem acumulada, estão nas Tabelas 12 e 13 (Marandu solteiro e consorciado com forrageiras de inverno, respectivamente). Destacada em negrito, a profundidade efetiva limite do sistema radicular em cada época do ano.

Tabela 12: Porcentagem do sistema radicular em relação à época do ano para capim Marandu em cultivo solteiro. Piracicaba/SP, 2018.

Porcentagem de raízes (%)								
Prof	Marandu Solteiro						Média	CV
(m)	Primavera	Acum.	Verão	Acum.	Outono	Acum.		(%)
0,1	55,3 A	55,3	37,47 B	37,47	26,79 B	26,79	39,85	36,14
0,2	12,15 B	67,45	19,86 AB	57,33	27,62 A	54,41	19,88	38,92
0,3	8,60 A	76,05	7,77 A	65,1	14,57 A	68,98	10,31	35,97
0,4	5,92 A	81,97	8,66 A	73,76	8,06 A	77,04	7,55	19,09
0,5	4,01 C	85,98	8,85 A	82,61	6,95 AB	83,99	6,60	36,93
0,6	6,51 A	**92,49**	6,17 A	**88,78**	4,26 A	88,25	5,65	21,48
0,7	3,12 A	95,61	4,16 A	92,94	3,12 A	**91,37**	3,47	17,32
0,8	2,45 A	98,06	3,12 A	96,06	5,52 A	96,89	2,86	12,62
0,9	1,94 A	100,0	3,94 A	100,0	3,11 A	100,0	2,94	48,10

Letras minúsculas diferentes (nas linhas) indicam diferença significativa entre tratamentos (estações).

Tabela 13: Porcentagem do sistema radicular em relação à época do ano para capim Marandu em cultivos consorciados. Piracicaba/SP, 2018.

Porcentagem de raízes (%) - Inverno						
Prof	MAA		MCA		Média	CV
(m)	Camada	Acum.	Acum.	Acum.		(%)
0,1	68,35	68,4	68,25	68,3	68,3	0,10
0,2	9,38	77,7	10,98	79,2	10,18	11,11
0,3	8,33	86,1	12,08	**91,3**	10,21	25,98
0,4	3,7	**89,8**	4,23	95,5	3,97	9,45
0,5	4,78	94,5	1,58	97,1	3,18	71,16
0,6	2,07	96,6	1,13	98,3	1,6	41,54
0,7	1,1	97,7	0,73	99,0	0,92	28,59
0,8	1,5	99,2	0,38	99,4	0,94	84,25
0,9	0,8	100,0	0,65	100,0	0,73	14,63

Letras minúsculas diferentes (nas linhas) indicam diferença significativa entre tratamentos (estações).
[1] Marandu + aveia preta + azevém (MAA)
[2] Marandu + centeio + azevém (MCA)

No período de cultivo solteiro do capim Marandu, notou-se que a profundidade efetiva do sistema radicular oscilou entre 50 e 70 cm de acordo com a estação do ano, apresentando maior concentração na primeira camada (0-10 cm). A concentração de raízes na primeira camada do solo foi maior na primavera (56,8%) e mudou no verão (33%) e no outono (27%). Entretanto, considerando o perfil inteiro, a concentração de raízes foi maior no verão, pois a profundidade efetiva do sistema radicular ocorreu entre 0,5 e 0,6 m. Stumpf *et al.* (2016) analisaram o sistema radicular de *Urochloa brizantha* com 103 meses de revegetação em solo degradado em Candiota (RS), com amostragem 0,3 m de profundidade, e obtiveram uma porcentagem de 64,72 % do sistema radicular na camada de 0,10 m. Os resultados do presente trabalho mostram maior distribuição do sistema radicular no perfil do solo, chegando à profundidade de 0,9 m e com concentração máxima de 56,8% na camada de 0-10 cm no início da primavera.

Em relação à profundidade de raízes das gramíneas, a média é de 44% de sua massa concentrada na camada até 0,10 m e 75% nos primeiros 0,30 m (JACKSON *et al*., 1996; PEEK *et al.*, 2005). Cunha *et al.* (2010) trabalharam com *Urochloa brizantha* e observaram, após dois anos de cultivo, que 80% de seu sistema radicular concentrou-se até 0,5 m de profundidade, valor próximo ao encontrado no presente trabalho. Outro ponto a ser destacado é o fato de a textura do solo influenciar o prolongamento do sistema radicular. Devido às diferenças de armazenamento de água, solos arenosos são mais propícios ao aprofundamento das raízes do que os solos mais argilosos (SCHENK e JACKSON, 2002).

No período em que ocorreu a sobressemeadura, principalmente no inverno, em ambos os cultivos consorciados, houve aumento da concentração de raízes em camadas mais próximas à superfície, com cerca de 68% das raízes na primeira camada (Tabela 13). Assim, a profundidade efetiva do sistema radicular passou a ser de 0,4 m para o consórcio Marandu + aveia preta + azevém, e de 0,3 m para Marandu + centeio + azevém. Tal mudança implica em repensar o manejo da irrigação, pois continuar irrigando pastagens no período de sobressemeadura (outono-inverno) como se faz durante o período de cultivo solteiro (primavera-verão) implicaria em perdas de água por percolação profunda e custos adicionais desnecessários.

Fan *et al.* (2016) analisaram a profundidade efetiva do sistema radicular de aveia e de cevada por meio de banco de dados em diversas localidades do mundo, e observaram que 67-76% de suas raízes estão localizadas até 0,3 m da superfície do solo, corroborando com os dados obtidos neste trabalho. Quanto a estudos do sistema radicular do azevém, pesquisas anteriores

revelaram que mais de 80% das raízes desta cultura estão distribuídas no solo entre 0 e 0,5 m de profundidade (KECHAVARZI *et al*., 2007; Ye *et al*., 2015).

Nos demais períodos houve maior distribuição do sistema radicular e sua profundidade efetiva oscilou entre 0,5 e 0,6 m na primavera e no verão, e entre 0,6 e 0,7 m no outono. A elongação do sistema radicular está atrelada à estratégia de reposição da água consumida em um período de elevada temperatura (EL SHARKAWY, 2007). Neste experimento o manejo da irrigação visou à reposição de água para a planta, mas em uma frequência (4 dias) que possibilitou oscilações acentuadas da umidade no solo; portanto, as culturas não estiveram em situação de déficit hídrico. Todavia, devido ao maior fotoperíodo e à consequente elevação da produção de forragem, a adubação nitrogenada periódica pode ter interferido no alongamento do sistema radicular.

A amostragem de primavera ocorreu no dia 17/11/2017, a de verão ocorreu no dia 18/03/2018, a de outono, em 21/05/2018 e a de inverno, em 12/08/2018.

A variação da umidade do solo (Δθ, em %CAD) nas parcelas experimentais durante as estações do ano pode ser observada nas Figuras 24, 25 e 26.

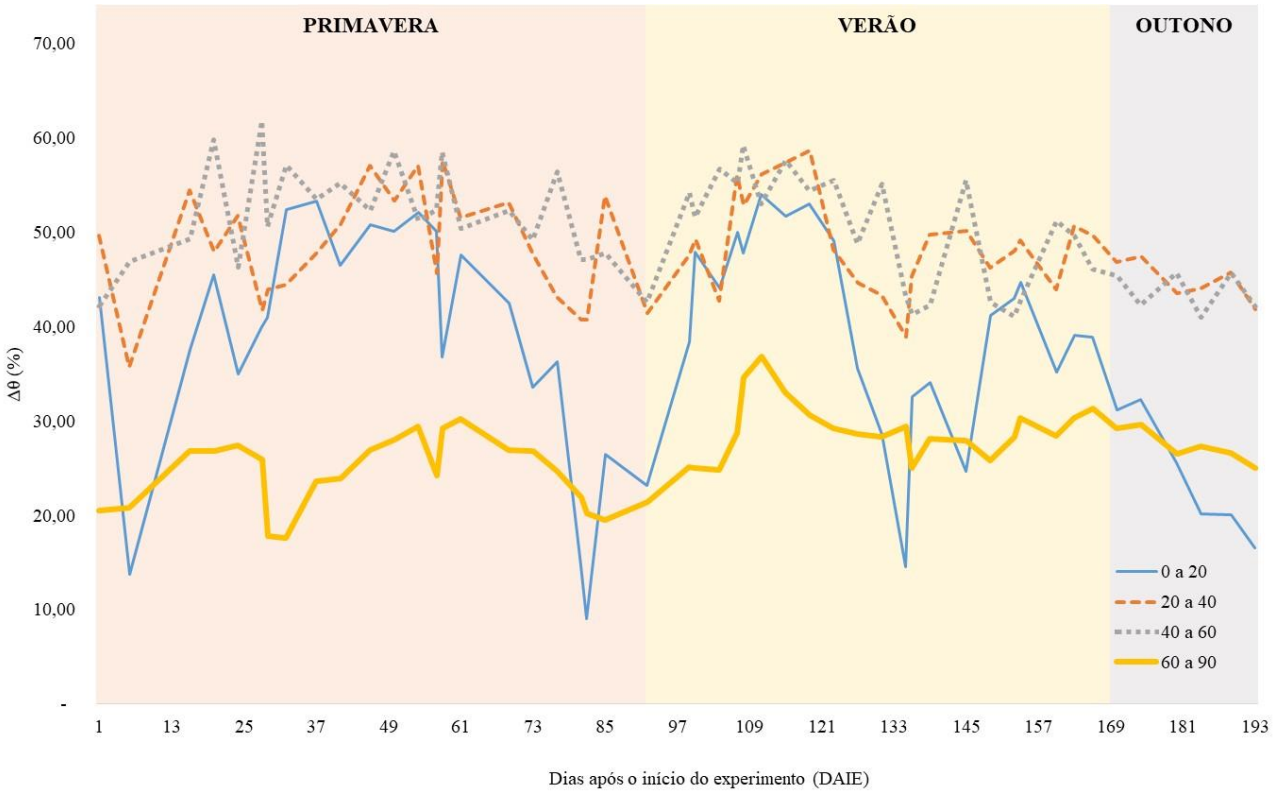

Figura 24: Variação da umidade do solo (Δθ, %) em porcentagem da CAD (mm cm^{-1}) para as camadas de solo 0-0,2 m, 0,2-0,4 m, 0,4-0,6 m e 0,6-0,9 m, em capim Marandu solteiro, Piracicaba/SP, 2018.

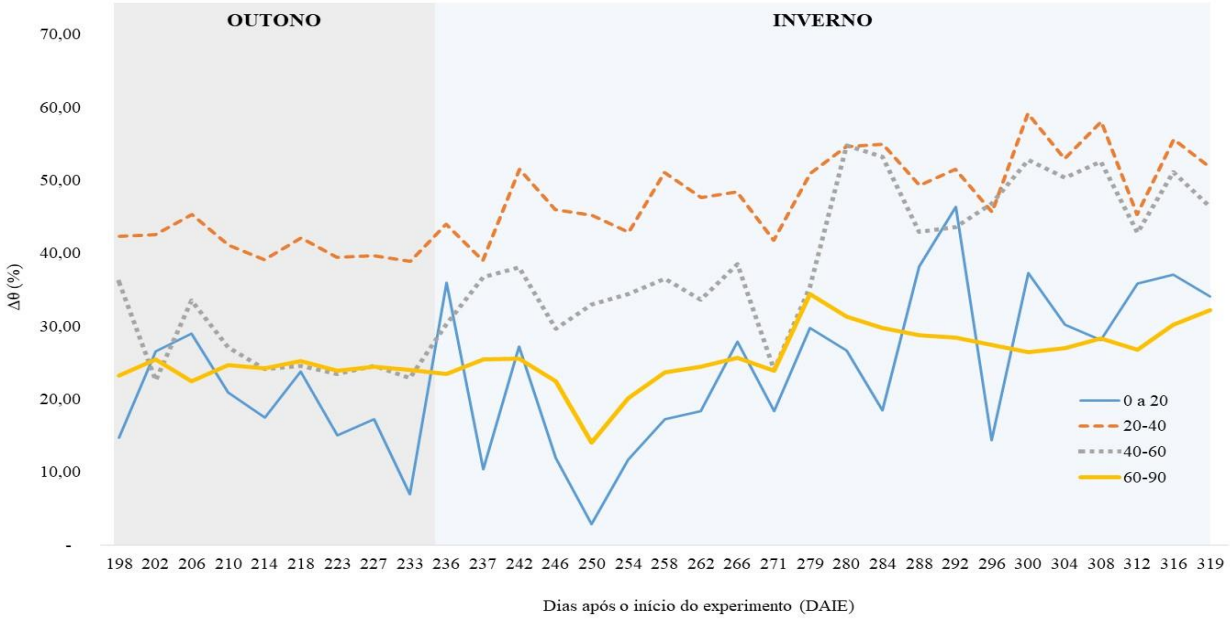

Figura 25: Variação da umidade do solo (Δθ, %) em porcentagem da CAD (mm cm^{-1}) para as camadas de solo 0-0,2 m, 0,2-0,4 m, 0,4-0,6 m e 0,6-0,9 m, em capim Marandu consorciado com aveia preta e azevém, Piracicaba/SP, 2018.

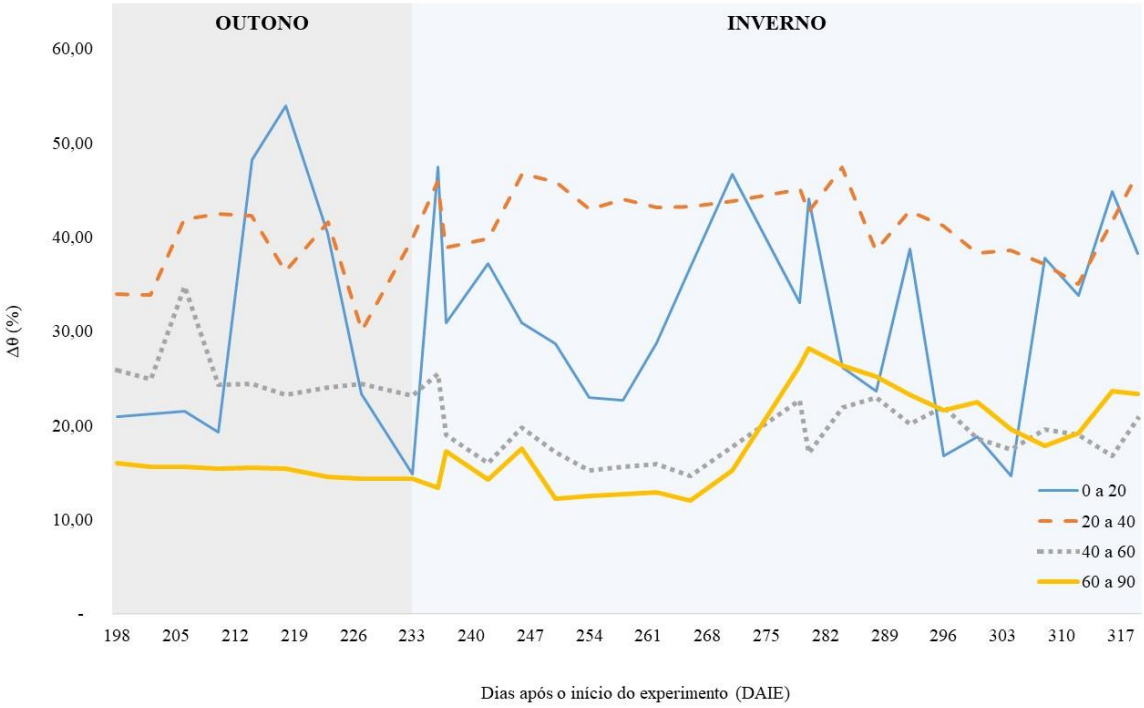

Figura 26: Variação da umidade do solo (Δθ, %) em porcentagem da CAD (mm cm^{-1}) para as camadas de solo 0-0,2 m, 0,2-0,4 m, 0,4-0,6 m e 0,6-0,9 m, em capim Marandu consorciado com centeio e azevém, Piracicaba/SP, 2018.

Observa-se, em todos os tratamentos (solteiro e consorciados), maior variação de umidade na camada de 0-0,2 m, cuja amplitude vai diminuindo de acordo com a profundidade até uma relativa estabilidade na camada mais profunda (0,6-0,9 m). No período de cultivo com Marandu solteiro, a $\Delta\theta$ na camada de 0-0,2 m apresentou valores de 10,74% a 54,68%, evidenciando uma influência da atividade radicular de absorção de água em períodos distintos. As oscilações dependem do clima, do estágio de crescimento da forrageira e da precipitação pluvial. Em períodos mais quentes e sem chuva, a tendência é que haja maior amplitude de $\Delta\theta$, %, e em períodos de temperaturas mais amenas e com chuvas há menor oscilação. Entretanto em qualquer período, a oscilação de umidade sempre foi maior na primeira camada de solo.

No período de cultivo consorciado e no consórcio de aveia preta e azevém, nota-se maior variação de umidade nas camadas de 0-0,2 m e de 0,2 a 0,4 m, em comparação com o consórcio de centeio e azevém. Essa variação indica que as culturas de aveia preta e azevém aprofundaram mais suas raízes, corroborando com a distribuição do sistema radicular encontrada nas camadas de 0,2 a 0,4 m, constatada nas coletas de campo.

Ressalta-se que nem sempre a atividade do sistema radicular está correlacionada com a massa seca radicular, pois a participação efetiva das raízes de cada camada na absorção de nutrientes e água depende de sua idade e espessura; raízes velhas e espessas absorvem menos água e nutrientes (MENGEL e KIRKBY, 2001).

Como exemplo, apresentam-se os dados das Tabelas 14 e 15, que mostram a percentagem de extração de água, a respectiva percentagem de raízes e a proporção entre extração e raízes em cada profundidade. Nas camadas em que as raízes tiveram maior atividade de absorção, a percentagem de raízes é inferior à percentagem de extração de água ($E/R > 1$). Nas camadas de menor atividade, ocorre o oposto ($E/R \leq 1$).

Tabela 14: Porcentagem do sistema radicular, porcentagem da extração de água e razão entre porcentagem da extração de água e porcentagem do sistema radicular, em relação à época do ano para capim Marandu solteiro. Piracicaba/SP, 2018.

Prof.	Primavera			Verão			Outono		
(m)	Extração de água (%)	Raízes (%)	E/R*	Extração de água (%)	Raízes (%)	E/R*	Extração de água (%)	Raízes (%)	E/R*
0,1	42,38	55,30	0,8	29,70	37,47	0,8	16,00	26,79	0,6
0,2	26,50	12,15	2,2	18,98	19,86	1,0	23,21	27,62	0,8
0,3	17,53	8,60	2,0	23,02	7,77	3,0	15,55	14,57	1,1
0,4	4,33	5,92	0,7	10,06	8,66	1,2	21,18	8,06	2,6
0,5	6,15	4,01	1,5	16,70	8,85	1,9	5,26	6,95	0,8
0,6	3,12	6,51	0,5	1,54	6,17	0,2	12,97	4,26	3,0
0,7	-	-	-	-	-	-	5,82	3,12	-

* E/R - razão % Extração : % Raízes

Na primavera, as raízes mais ativas estavam a 0,2 e 0,3 m (E/R = 2,2 e 2,0, respectivamente); no verão, a 0,3 e 0,5 m (E/R = 3,0 e 1,9, respectivamente); e no outono, a 0,4 e 0,6 m (E/R = 2,6 e 3,0, respectivamente). No inverno houve mudança na atividade de absorção de água das raízes. Devido ao consórcio com as forrageiras de inverno, a maior atividade ocorreu a 0,2 e 0,4 m no consórcio Marandu + aveia + azevém (E/R = 1,9 e 5,9, respectivamente) e a 0,2 m no consórcio Marandu + centeio + azevém (E/R = 3,0).

Tabela 15: Porcentagem do sistema radicular, porcentagem da extração de água e razão entre porcentagem da extração de água e porcentagem do sistema radicular, em relação à época do ano para capim Marandu consorciado. Piracicaba/SP, 2018.

Prof.	Inverno					
(m)	MAA			MCA		
(m)	Extração de água (%)	Raízes (%)	E/R*	Extração de água (%)	Raízes (%)	E/R*
0,1	50,54	68,35	0,7	58,06	68,25	0,9
0,2	17,83	9,38	1,9	32,90	10,98	3,0
0,3	9,68	8,33	1,2	9,03	12,08	0,7
0,4	21,95	3,70	5,9	-	-	-

* E/R - razão % Extração : % Raízes

Como a atividade de absorção de água das raízes mudou de acordo com a estação do ano, existe um indício de que as mudanças na disponibilidade hídrica estimularam o aprofundamento do sistema radicular. Tais mudanças podem subsidiar adaptações no manejo

da irrigação e da nutrição mineral das culturas, principalmente via fertirrigação.

Trabalhos acerca de sensores de medição de umidade do solo e sua correlação com o sistema radicular demonstraram bons resultados em relação à sua eficácia na detecção da atividade de absorção de água. Oliveira (2016) trabalhou com sonda EnviroScan para estimar ETc em cana de açúcar e observou que o equipamento foi eficiente no monitoramento de água de solo, auxiliando na percepção das profundidades em que houve maior ou menor extração de água. O autor informou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,93 entre a densidade de raízes e a extração por camada. Neste trabalho, o coeficiente de determinação entre a percentagem de extração de água e de concentração de raízes por camada foi de 0,71, menor que o encontrado pelo autor citado, mas que também indica uma boa precisão da sonda FDR para estimar atividade radicular.

Peterson *et al.* (2016) utilizaram uma sonda de nêutrons para estimar a umidade do solo na zona radicular em uma pastagem na região central do Canadá, observando que o método de estabilidade de tempo forneceu as melhores estimativas de umidade do solo em escala de campo (RMSE = 0,005 cm^3 cm^{-3}), tendo em vista que a sonda tem a limitação de fazer medições até 30 cm de profundidade.

Abrisqueta *et al.* (2008) utilizaram sonda FDR (Cprobe®) em estudo da dinâmica do sistema radicular de pessegueiro irrigado em Murcia-Espanha. Neste trabalho, os autores concluíram que a atividade de absorção de água do sistema radicular era maior nas camadas acima de 0,55 m, com raízes concentradas entre 0,40 e 0,55 m.

5.6. Parâmetros produtivos e produtividade de água do capim Marandu solteiro.

Os resultados dos parâmetros produtivos e de produtividade de água são apresentados na Tabela 16.

A maior produção de forragem (PTF, kg MS ha^{-1}) ocorreu no 2º ciclo, que diferiu significativamente dos demais, exceto do 4º ciclo. Destacam-se: (i) o fato da precipitação neste período ter sido a segunda maior ocorrida entre os ciclos (255,7 mm); (ii) a ocorrência de temperaturas mais amenas se comparado ao 4º ciclo (259,8 mm de precipitação), com média diária de 23,6ºC; (iii) a radiação liquida e o fotoperíodo suficientes para que a cultura atingisse o melhor desempenho.

Tabela 16: Dados médios por ciclo de produtividade total de forragem, produção de material morto, altura do dossel forrageiro, índice de área foliar e produtividade de água de capim Marandu em cultivo solteiro. Piracicaba/SP, 2017/2018.

Ciclo	Datas	PTF (kg MS ha^{-1})	PMM (kg ha^{-1})	ADF (cm)	IAF	PA (kg MS m^{-3})
1	set-out	2637,55 cd	34,30 c	38,10 b	1,63 c	3,17 b
2	out-nov	3732,65 a	64,25 bc	41,30 b	3,30 b	4,50 ab
3	nov-dez	2678,85 bcd	71,65 bc	41,30 b	4,24 ab	3,21 b
4	dez-jan	3377,65 ab	61,05 c	58,60 a	4,44 ab	5,15 a
5	jan-fev	2947,30 bcd	155,15 ab	57,30 a	4,92 a	3,12 b
6	fev-mar	2307,00 c	27,35 c	56,25 a	4,64 ab	3,94 ab
7	abr-mai	1068,95 d	240,85 a	39,55 b	3,34 b	1,31 c

Letras minúsculas diferentes (nas linhas) indicam diferença significativa entre tratamentos (ciclos)
Produtividade total de forragem (PTF)
Produção de material morto (PMM)
Altura do dossel forrageiro (ADF)
Índice de área foliar (IAF)
Produtividade da água (PA)

Souza (2017) realizou experimento com capim Marandu na região de Piracicaba/SP e verificou que a maior produção de sete ciclos produtivos, aproximadamente 2500 kg ha^{-1}, ocorreu no início da primavera, semelhante ao que ocorreu no presente trabalho. Machado *et al*. (2017) trabalharam com *Urochloa decumbens* (Stapf) Webster cv. Basilisk na região central de Minas Gerais e verificaram uma taxa de acúmulo diário de 136,6 kg ha^{-1} dia^{-1}, obtida com dose de nitrogênio de 100 kg ha^{-1} ano^{-1}. No presente trabalho, o período mais produtivo alcançou taxa de 133,31 kg ha^{-1} dia^{-1}, próxima à obtida pelos autores citados.

No ciclo 7 a produção total de forragem sofreu uma redução de 71,36% em relação ao ciclo 2. Como o ciclo 7 ocorreu no período de outono, tal queda de produção foi influência da redução da radiação solar e das temperaturas mínimas (12,1º C) sobre a produção do capim Marandu. Alencar *et al*. (2013) mediram a produção de forragem do capim Marandu nos períodos de primavera/verão e outono/inverno e observaram diferenças produtivas entre 49,5% e 53,9%, em doses crescentes de nitrogênio. Barbosa *et al.* (2007) verificaram uma queda de 60% entre os mesmos períodos, em capim Tanzânia, valor próximo ao encontrado no presente trabalho.

Para o índice de área foliar (IAF), os menores valores encontrados ocorreram nos ciclos 1, 2 e 7. O mesmo também ocorreu em relação à altura do dossel forrageiro (ADF, cm). No primeiro ciclo, houve erro no uso do equipamento de medição, que pode ter resultado no baixo

valor apresentado. O maior IAF constatado ocorreu no ciclo 5, entre os meses de janeiro e fevereiro. Sbrissia e Silva (2008) estimaram o IAF do capim Marandu utilizando métodos destrutivos direto e indireto, e indireto não destrutivo (LAI-2000) na região de Piracicaba/SP. Os autores encontraram um valor de IAF = 5,0 no verão, na média dos três métodos de estimativa, valor muito próximo ao encontrado no presente trabalho.

No 7º ciclo (período de outono) houve um declínio do IAF, em razão do menor fotoperíodo e da redução das temperaturas médias. Gomide *et al.* (2009) observaram o mesmo em capim Marandu, obtendo um IAF de 3,1 no período estacional, valor que corrobora com o obtido neste experimento.

Com relação à eficiência de uso da água, o capim Marandu apresentou produtividade de água (PA) entre 1,31 e 5,15 kg MS m^{-3}. Os valores se aproximam dos encontrados por Lopes *et al.* (2014), que conduziram um experimento com *Urochloa decumbens* sob diferentes lâminas de irrigação e encontraram valores de PA entre 2,2 e 4,4 kg MS m^{-3}. Sanchez (2017) realizou experimento com o capim Mombaça na região de Piracicaba/SP e estimou uma PA média anual 3,3 kg MS m^{-3}, valor similar ao encontrado em boa parte dos ciclos do presente experimento.

Pelos resultados obtidos, fica clara a necessidade de se utilizar técnicas para aumentar a resposta das pastagens à irrigação no período estacional das forrageiras tropicais.

5.7. Parâmetros produtivos e produtividade de água do capim Marandu consorciado.

Os resultados dos parâmetros produtivos e de produtividade de água do capim Marandu consorciado com aveia preta + azevém e centeio + azevém são apresentados nas Tabelas 17 e 18. O ciclo 8 ocorreu entre os meses de maio a junho, o ciclo 9 ocorreu entre os meses de julho a agosto e o ciclo 10 ocorreu entre os meses de agosto a setembro.

Em ambos os consórcios, os maiores valores de PTF ocorreram no 10º ciclo, mas com diferença significativa apenas entre os ciclos 8 e 10. Um dos fatores que podem justificar a maior produção neste período é a maior média de temperaturas mínimas, quando comparado às dos ciclos anteriores (12,4ºC no ciclo 8; 11,3ºC no ciclo 9; 13,3ºC no ciclo 10). Cabe ressaltar que a sobressemeadura ocorreu dois dias antes do início ciclo 8, o que certamente influenciou a menor produção de forragem nesse ciclo, devido ao período necessário ao estabelecimento das forrageiras de inverno. Os resultados de PTF dos consórcios assemelham-se ao encontrado por Souza (2017), que obteve valores entre 1200 e 2700 kg MS ha^{-1} em cinco ciclos de capim Marandu consorciado com aveia preta + azevém, na região de Piracicaba-SP.

Tabela 17: Dados médios de produtividade total de forragem (PTF), produção de material morto (PMM), altura do dossel forrageiro (ADF), índice de área foliar (IAF) e produtividade de água (PA) para capim Marandu consorciado com aveia e azevém (MAA) e com centeio

Ciclo	MAA				
	PTF (kg MS ha^{-1})	PMM (kg ha^{-1})	ADF (cm)	IAF	PA (kg MS m^{-3})
8	1171,70 b	51,70 b	40,20 c	5,09 b	1,39 b
9	2597,20 a	747,60 a	54,80 b	5,25 ab	2,78 a
10	3246,30 a	468,40 a	62,30 a	5,70 a	3,14 a
Média	2338,40	422,57	52,43	5,35	2,44
	MCA				
	PTF (kg MS ha^{-1})	PMM (kg ha^{-1})	ADF (cm)	IAF	PA (kg MS m^{-3})
8	898,40 b	11,73 c	53,60 b	4,26 c	0,99 b
9	2324,70 a	950,60 a	74,40 a	5,97 a	2,17 a
10	2926,80 a	437,20 ab	72,10 a	5,67 b	2,73 a
Média	2049,97	466,51	66,70	5,30	1,96

Letras minúsculas diferentes (nas linhas) indicam diferença significativa entre tratamentos (ciclos)
Produtividade total de forragem (PTF)
Produção de material morto (PMM)
Altura do dossel forrageiro (ADF)
Índice de área foliar (IAF)
Produtividade da água (PA)

Na separação botânica entre o capim Marandu e forrageiras de inverno nos consórcios (Tabela 18), houve maior produção do consórcio centeio + azevém no ciclo 8, um aumento acentuado no consórcio aveia preta + azevém no ciclo 9, e uma aproximação dos resultados de ambos os consórcios no ciclo 10. Tais resultados se devem à precocidade produtiva do centeio em relação à aveia preta. O primeiro tem 55% de sua produção entre maio e julho, e a segunda tem produção concentrada nos meses de junho e julho (POSTIGLIONI, 1982). O equilíbrio do décimo período pode ser explicado pelo desenvolvimento dos perfilhos de azevém, que foi utilizado em ambos os consórcios e cuja produção é tardia em relação à aveia preta (CARVALHO *et al.*, 2011).

Tabela 18: Dados médios da produção de forragem de capim Marandu e das forrageiras de inverno em cada consórcio, por ciclo de cultivo. Piracicaba/SP, 2017/2018.

Ciclo	Marandu	Aveia Preta + Azevém	Centeio + Azevém
	(kg MS ha^{-1})		
8	910,5	61,3	187,8
9	1068,8	1908,2	876,1
10	1459,8	1647,6	1606,0

Os resultados da produção do consórcio centeio + azevém entre os ciclos 9 e 10 aproximaram-se do encontrado por Roso *et al.* (2000), que trabalharam com esse mesmo consórcio e obtiveram uma produção que variou de 993 a 1761 kg MS ha^{-1}, em ciclos de 28 dias, em período do inverno à primavera, na região de Santa Maria, RS.

Houve um aumento na produção de material morto no 9º ciclo, comparado ao cultivo solteiro de primavera e verão. O maior acúmulo de material morto pode ser atribuído às variações dos fatores de crescimento nos períodos mais secos e frios do ano, em que há restrição ao crescimento das forrageiras tropicais, e ao aumento da proporção de tecidos mortos na base do dossel (CARNEVALLI *et al*., 2006; BARBOSA *et al*., 2007).

Em relação à altura do dossel forrageiro (ADF), o consórcio centeio + azevém apresentou maiores valores do que aveia preta + azevém. Gralak *et al*. (2014) estimaram uma ADF média de 41,2 cm para azevém + aveia preta, valor próximo ao encontrado no oitavo ciclo do presente experimento. Como os ciclos de cultivo tiveram duração de 42 dias, houve perfilhos que já estavam na fase de florescimento e apresentaram alturas elevadas, principalmente no consórcio centeio + azevém.

Os valores de índice de área foliar (IAF) no período de cultivo consorciado foram maiores que os obtidos no cultivo solteiro, sendo que o consórcio aveia preta + azevém apresentou maiores valores de IAF se comparado ao consórcio centeio + azevém. Os resultados apresentados foram ligeiramente inferiores aos encontrados por Souza (2017), que realizou experimento com o consórcio Marandu + aveia preta + azevém em Piracicaba/SP e estimou o IAF final de 6,7 a 6,9. Gralak *et al.* (2014) obtiveram um IAF final de 4,75 para um consórcio com 50% aveia preta + 50% azevém, valor próximo do encontrado nos ciclos 8 e 9 do presente experimento.

Kottmann (2015) estimou o IAF para a cultura do centeio no norte da Alemanha, obtendo o valor de 4,9 com uma interceptação de 95% da radiação fotossinteticamente ativa, utilizando como instrumento um SunScan canopy analysis system (Delta-T Devices, Cambridge, UK). No presente trabalho, os valores de IAF estimado nos três ciclos foram superiores ao encontrado pelo autor. Uma das razões para tal superestimativa pode ser o incremento de material morto durante os ciclos e a limitação do LAI-2000 em distinguir tecidos vivos e mortos (WELLES e NORMAN, 1991). Este aparelho analisa toda a superfície da planta passível de contribuição para a interceptação de luz, que é considerada nos cálculos de área foliar realizados pelo aparelho (MOLAN, 2004). O mesmo vale para o consórcio de aveia preta e azevém.

Com exceção do 10º ciclo do consórcio centeio + azevém, pode-se dizer que o aumento da produção de massa seca acompanhou o IAF estimado, corroborando com a premissa de que este parâmetro está ligado à interceptação de luz, à capacidade fotossintética e à produção da biomassa da parte aérea (BREDA, 2003).

Em relação à produtividade de água (PA), os menores valores foram constatados no ciclo 8 em ambos os consórcios, não havendo diferença significativa entre os ciclos 9 e 10. Os valores de produtividade de água obtidos, principalmente dos ciclos 8 e 9, aproximam-se dos encontrados por Neal *et al*. (2011), que estimaram valores de PA entre 0,95 e 2,5 kg MS m^{-3} no período outono/inverno em consórcio de aveia + azevém. No 10º ciclo houve valores mais elevados de PA, de 2,73 a 3,14 kg MS m^{-3}. Sanches (2017) estimou um valor médio de 3,05 kg MS m^{-3}, em um consórcio de capim Mombaça com aveia preta e azevém, em Piracicaba-SP, sendo um valor intermediário e próximo do encontrado neste trabalho.

Os resultados de PTF e PA obtidos no cultivo solteiro e nos cultivos consorciados permitem observar que as forrageiras de inverno em sobressemeadura aumentaram acentuadamente a oferta de forragem no período de outono e inverno.

Tomando como base os valores do ciclo 7 (cultivo solteiro) e comparando às médias dos consórcios Marandu + aveia preta + azevém (MAA) e Marandu + centeio + azevém (MCA) nos ciclos 8 a 10, percebe-se que a PTF aumentou em 119% e 92% nos consórcios MAA e MCA, respectivamente. De modo similar, houve aumentos da PA, de 86% e 50% para MAA e MCA, respectivamente.

Por outro lado, verifica-se a necessidade de ajustes no manejo de cultivos consorciados, possivelmente utilizando ciclos mais curtos para reduzir a produção de material morto (PMM). Observa-se que a PMM nos cultivos consorciados aumentou em 75% (MAA) e 94% (MCA), em relação ao cultivo solteiro no ciclo 7, um sinal claro de ciclos excessivamente longos.

Por fim, ressalta-se que o IAF médio dos cultivos consorciados foi 60% maior que o encontrado no ciclo 7 do cultivo solteiro da área foliar, o que reflete no coeficiente de cultura (Kc) e, consequentemente, no planejamento (projeto) e no manejo da irrigação.

6. CONCLUSÃO

A técnica capacitiva FDR mostrou-se eficaz na estimativa de ETc e Kc dos dosséis forrageiros em cultivo solteiro e consorciado, obtendo-se valores próximos ao método padrão (lisimetria de pesagem), durante as quatro estações do ano.

A calibração específica da sonda FDR por camada do solo permitiu contornar possíveis vieses advindos da heterogeneidade do perfil do solo.

Maiores níveis de precisão e exatidão nas estimativas de ETc e Kc foram obtidos com a estimativa de fluxos descendentes e ascendentes de água, usados para corrigir o balanço hídrico para manejo da irrigação.

A técnica capacitiva também foi eficaz na verificação da atividade de absorção de água pelo sistema radicular, possibilitando aferir zonas com alta ou baixa atividade.

Houve variação de concentração e atividade radicular entre o período consorciado e solteiro.

A sobressemeadura aumentou a produção de forragem durante o período estacional, com maior produtividade no consórcio Marandu + aveia preta + azevém.

REFERÊNCIAS

ABRAHA, M. G.; SAVAGE, M. J. The soil water balance of rainfed and irrigated oats, Italian rye grass and rye using the CropSyst model. Irrigation Science, v. 26, n. 3, p. 203-212, 2008.

ABRISQUETA, J. M.; MOUNZER, O.; ÁLVAREZ, S.; CONEJERO, W.; GARCÍA-ORELLANA, Y.; TAPIA, L. M.; RUIZ-SÁNCHEZ, M. C. Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. Agricultural Water Management, v. 95, n. 8, p. 959-967, 2008.

ALENCAR, C. A. B. D.; CUNHA, F. F. D.; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; OLIVEIRA, R. A.; ARAÚJO, R. A. S. Adubação nitrogenada e estações anuais na produção de capins irrigados no leste mineiro sob corte. Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, v. 14, n. 3, 2013.

AL-GHOBARI, H. M.; EL MARAZKY, M. S.; ABOUKARIMA, A. M.; MINYAWI, M. Calibration of Soil Water Content Data from EnviroSCAN System Using Artificial Neural Network. American Journal of Experimental Agriculture, v. 12, n. 5, 2016.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; WRIGHT, J. L.; HOWELL, T. A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITENFISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA, J.; YRISARRY, J.B.; SMITH, M.; PEREIRA, L.; RAES, D.; PERRIER, A.; ALVES, I.; WALTER, I.; ELLIOTT, R. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. Agricultural Water Management, v. 81, n. 1-2, p. 1-22, 2006.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 301 p. (FAO Irrigation and Drainage, Paper 56).

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Potencial elétrico superficial e carga elétrica líquida de latossolos ácricos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 18, n. 2, p. 181-185, 1994.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVEZ, J.D. DE; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDRADE, R.G.; LEIVAS, J.F.; GARCON, E.A.M.; SILVA, G.B.S.; LOEBMANN, D.G.S.W.; VICENTE, L.E.; VICTORIA, D.C. Monitoramento de processos de degradação de pastagens a partir de dados Spot Vegetation. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011. 16p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 19). Disponível em: Acesso em: 20 mar. 2018.

ANTONIEL, L. S.; PRADO, G. D.; ROCHA, T.; BOMBARDELLI, W. W. A.; BELTRAME, G. A.; BUENO, J. I. Irrigação no teor de proteína bruta de duas espécies de pastagens. Revista Irriga, Botucatu, Edição Especial, Grandes Culturas, p. 248-259, 2016.

ARAÚJO PRIMO, J. T. Dinâmica de água no solo e eficiência do uso de água em clones de palma forrageira no semiárido pernambucano. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal)-

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada, 108 f, 2013.

BAIER, A.C. Centeio. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT. 29p. (EMBRAPA-CNPT. Documentos, 15), 1994.

BARBOSA, B. D. S.; OLIVEIRA, F. G.; FIGUEIREDO, F. P. Determinação do coeficiente de cultivo (Kc) do capim Tanzânia irrigado no Norte de Minas Gerais. Irriga, Botucatu, Edição Especial, p. 11-20, 2015.

BARBOSA, R. A.; DO NASCIMENTO JÚNIOR, D.; EUCLIDES, V. P. B.; DA SILVA, S. C.; ZIMMER, A. H.; JÚNIOR, R. A. D. A. T. Capim-tanzânia submetido a combinações entre intensidade e frequência de pastejo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, n. 3, p. 329-340, 2007.

BARDUCCI, R. S.; COSTA, C.; CRUSCIOL, C. A. C.; BORGHI, E.; PUTAROV, T C.; SARTI, L. M. N. Produção de *Brachiaria brizantha* e *Panicum maximum* com milho e adubação nitrogenada. Archivos de zootecnia, v. 58, n. 222, p. 211-222, 2009.

BARROS, A.C.; FOLEGATTI, M.V.; SOUZA, C.F; SANTORO, B.L. Distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. Irriga, Botucatu, v.15, p.361-372, 2010.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. Journal of Experimental Botany, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8.ed. 2ª reimpressão. Viçosa: UFV, 2009. 625p.

BERTOLOTE, L. E. M. Sobressemeadura de Forrageiras de Clima Temperado em Pastagens Tropicais. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu, 84 p, 2009,.

BISCOLA, P. H. N.; PEREIRA, M. A.; COSTA, F. P. Relatório de avaliação dos impactos das tecnologias geradas pela Embrapa Gado de Corte. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2013.

BÖHME, B.; BECKER, M.; DIEKKRÜGER, B. Calibrating a FDR sensor for soil moisture monitoring in a wetland in Central Kenya. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, v. 66, p. 101-111, 2013.

BOTREL, M. D. A.; NOVAES, L. P.; ALVIM, M. J. Características forrageiras de algumas gramíneas tropicais. Embrapa Gado de Leite-Documentos (INFOTECA-E), 1998.

BOUYOUCOS, G. J. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. Soil Science, v. 23, n. 5, p. 343-354, 1927.

BREDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany, v. 54, n. 392, p. 2403 – 2417, 2003.

BRITO, R. R.; GRASSI FILHO, H.; SAAD, J. C. C.; OLIVEIRA, S. R. M. Produtividade do feijoeiro sob diferentes potenciais matriciais e fatores de depleção da água no solo. Nativa, Sinop, v. 03, n. 02, p. 109-114, 2015.

BRUNHARA, J.P.B.; CIRILO, L.S.; SANTORO, B.L.; BERTOLETTE, H.P.; SOUZA, C.F. Manejo da fertirrigação por gotejamento na cultura do pimentão (*Capsicum annum* L) sob Latossolo vermelho escuro distrófico. In: congresso brasileiro de engenharia agrícola, 40., 2011, Cuiabá. Anais... Cuiabá: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2011.

CAMPECHE, L. F. M. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 519–525, 2011.

CARAFFA, M.; PASIEKA, T. J.; SHUBEITA, F. M. Monitoramento on-line de umidade do solo com auxílio de Rede de Sensores Sem Fio. X Congresso Brasileiro de Agroinformática. 2015. Disponível em: < http://eventos.uepg.br/sbiagro/pdf > Acesso em: 20 nov. 2018.

CARNEVALLI, R. A.; DA SILVA, S. C.; BUENO, A. D. O.; UEBELE, M. C.; BUENO, F. O.; HODGSON, J.; MORAIS, J. P. G. Herbage production and grazing losses in *Panicum maximum* cv. Mombaça under four grazing managements. Tropical grasslands, v. 40, n. 3, p. 165, 2006

CECATO, U.; PEREIRA, L. A. F.; JOBIM, C. C.; MARTINS, E. N.; BRANCO, A. F.; GALBEIRO, S.; MACHADO, A. O. Influência das adubações nitrogenada e fosfatada sobre a composição químico-bromatológica do capim Marandu (*Brachiaria brizantha* (Hochst) Stapf cv. Marandu. Acta Scientiarum. Animal Sciences, v. 26, n. 3, p. 399-407, 2004.

CHÁVEZ, J. L.; EVETT, S. R. Using soil water sensors to improve irrigation management. In: Proc. 24th Annual Central Plains Irrigation Conf., Colby, KS. p. 21-22. 2012.

CLOTHIER, B.; COLLINS, D.; HEILER, T.; JENKINS, B.; MOWAT, A.; PYKE, N. Virtual Water: Emerging Issues. In: The Royal Society of New Zealand. 2009.

COELHO, R.D. Contribuições para irrigação pressurizada no brasil. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2007. Disponível em: <http: //www.lcb.esalq.usp.br/extension/DESAAFCA/café.pdf\nhttp://www.teses.usp.br/teses/disponíveis/livre-docência/11/tde-06112007-101254/em.php>.

COSTA, L.K.P.; SANTOS, M.E.R.; SILVA, G.P.; CARVALHO, B.H.R.; PESSOA, D.D.; GALZERANO, L.; SILVA, N.A.M. Reduction of sward height in the fall/winter as strategy to optimize tillering in *Urochloa brizantha* syn. *Brachiaria brizantha*. Archivos de Zootecnia, 65 (252): 499-506. 2016.

CRUZ-BLANCO, M.; LORITE, I. J.; SANTOS, C. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. Agricultural Water Management, v. 131, p. 135-145, 2014.

CURTO, L.; COVI, M.; GASSMANN, M. I.; CAMBARERI, M.; MAGGIORA, A. Della. Calibración de datos observados de contenido de agua en el suelo con sensores capacitivos. Meteorologica, v. 41, n. 2, p. 49–63, 2016.

DA SILVA, V. D. P.; ALBUQUERQUE, M. F. D.; ARAÚJO, L. E. D.; CAMPOS, J. H. D. C.; GARCÊZ, S. L.; ALMEIDA, R. S. Measurements and modelling of water footprint of sugarcane cultivated in Paraíba State. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 6, p. 521-526, 2015.

DANTAS, G. F; FARIA R.T; SANTOS G.O; DALRI A. B; PALARETTI L. F. Produtividade e qualidade da brachiaria irrigada no outono/inverno. Engenharia Agrícola. 36 p.:469-481, 2006.

DE CONTI MEDINA, C.; NEVES, C. S. V. J.; DE BATISTA FONSECA, I. C.; TORRETI, A. F. Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 23, n. 2, p. 179-184, 2002.

DIAS-FILHO, M.B. Diagnóstico das pastagens no Brasil. Belém, PA:Embrapa Amazônia Oriental, 36p, 2014.

EL-SHARKAWY, M. A. Physiological characteristics of cassava tolerance to prolonged drought in the tropics: implications for breeding cultivars adapted to seasonally dry and semiarid environments. Brazilian Journal of Plant Physiology, v. 19, n. 4, p. 257-286, 2007.

EMBRAPA SOLOS. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. 212p.

EMBRAPA. Embrapa Gado de Corte. Marandu: cultivar de Urochloa brizantha. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2007. 2p. Disponível em: http://www.cnpgc.embrapa.br/ produtoseservicos/pdf/marandu.pdf. Acesso em: 30 jul. 2007.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. USDA.gov - United States. Department of Agriculture. Disponível em: <http://www.usda.gov>. Acesso em: 03 mai. 2018.

ESTEBAN, D. A. A. Atributos do solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar com diferentes espaçamentos de plantio e controle de tráfego. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 118p, 2018.

EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. Soil profile water content determination. Vadose Zone Journal, v. 5, n. 3, p. 894-907, 2006.

FAN, J.; MCCONKEY, B.; WANG, H.; JANZEN, H. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. Field Crops Research, v. 189, p. 68-74, 2016.

FAOAQASTAT. Area equipped for full control irrigation. Disponível em:http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en.Acesso em 10 dez 2016.

FEALQ. Análise Territorial para o Desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil. Projeto de Cooperação Técnica IICA/BRA/08/002,, 2014.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. Reunião anual da região brasileira da sociedade internacional de biometria, v. 45, n. 2000, p. 235, 2000.

FONTANELI, R. S.; SOLLENBERGER, L. E.; LITTELL, R. C.; STAPLES, C. R. Performance of lactating dairy cows managed on pasture-based or in freestall barn-feeding systems. Journal of Dairy Science, v. 88, n. 3, p. 1264-1276, 2005.

FRADEN, J. Handbook of modern sensors: Physics, Designs and Applications. 4 ed. New York, Springer, 2010.

FRANÇA DA CUNHA, F.; MOTA RAMOS, M.; BRASILEIRO DE ALENCAR, C. A.; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; ALVES DE OLIVEIRA, R. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 32, n. 2, 2010.

FUJIWARA, M.; KURACHI, S.A.H.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M. & SAKAI, E. A técnica de estudo de raízes pelo método do trado. Boletim Técnico, 153 Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 9p, 1994.

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, v. 146, p. 1-10, 2014.

GARDNER, C.M.K.; BELL, J.P.; COOPER, J.D; DEAN, T.J.; HODNETT, M.G.; GARDNER, N. Soil water content. In: SMITH, R.A.; MULLINGS, C.E. (Ed.) Soil analysis: physical methods. New York: Marcel Dekker cap.1, p.1-73. 1991.

GERDES, L.; MATTOS, H. B.; WERNER, J. C.; COLOZZA, M. T.; SANTOS, L. E.; CUNHA, L. A.; BUENO, M. S.; SCHAMMASS, E. A. Características do dossel forrageiro e acúmulo de forragem em pastagem irrigada de capim-aruana exclusivo ou sobressemeado com uma mistura de espécies forrageiras de inverno. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 34, n.4, p. 1088-1097, 2005.

GHIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; TRIVELIN, P.C.O. Components of the water balance in soil with sugarcane crops. Agricultural Water Management, v. 102, n. 1, p. 1-7, 2011.

GIMENES, F. D. A.; DA SILVA, S. C.; FIALHO, C. A.; GOMES, M. B.; BERNDT, A.; GERDES, L.; COLOZZA, M. T. Ganho de peso e produtividade animal em capim-marandu sob pastejo rotativo e adubação nitrogenada. Embrapa Pecuária Sudeste-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2011.

GOMIDE, C. A. M.; REIS, R. A.; SIMILLI, F. F.; MOREIRA, A. L. Atributos estruturais e produtivos de capim-marandu em resposta à suplementação alimentar de bovinos e a ciclos de pastejo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 44, n. 5, p. 526-533, 2010.

GRALAK, E.; MORAES, A; LUSTOSA, S.B.C; MARTINICHEN, D.; GALBEIRO, S.; SILVA, G.T. Produção de forrageiras anuais de inverno sob densidades de semeadura. Pesquisa Agropecuária Gaúcha, v.20, ns. ½, p.80-86, 2014.

GUIMARÃES, P. L. O.; SANTANA, A.A.M.; OLIVEIRA R.I.; THOMAZ JÚNIOR, C.J. . Proposta de procedimento para calibração de sensores e medidores de umidade do solo (Soil Moisture). In: Congresso da Qualidade em Metrologia, 2010. São Paulo, Anais...São Paulo: ENQUALAB, 2010.

HABERLAND, J.; GÁLVEZ, R.; KREMER, C.; ZUÑIGA, C.; RUDOLFFI, Y. Accurate soil water content monitoring in real time with appropriate field calibration of the fdr device "diviner 2000" in a commercial table grape vineyard. International Journal of Science Environment and Technology, v. 4, n. 2, p. 273-284, 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física. Vol. 3. 8 ed. Editora LTC, 2009.

HUANG, Q.; O. O. AKINREMI.; R.S. RAJAN.; R. BULLO CK. Laboratory and field evaluation of five soil water sensors. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, v. 84, n. 4, p. 431–438, 2004.

JACKSON, R.B.; CANADELL, J.; EHLERINGER, J.R.; MOONEY, H.A.; SALA, O.E.; SCHULZE, E.D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. Oceologia, v.108, p.389-411, 1996.

JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T.T., (Ed.) Water Deficits and Plant Growth, v.2, p. 1-22, 1968.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; MINELLA, J.P.G. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.34, p.649-658, 2010.

KECHAVARZI, C.; PETTERSSON, K.; LEEDS-HARRISON, P.; RITCHIE, L.; LEDIN, S. Root establishment of perennial ryegrass (*L. perenne*) in diesel contaminated subsurface soil layers. Environmental Pollution, v. 145, n. 1, p. 68-74, 2007.

KICHEL, A.N.; COSTA, J.A.A.; ALMEIDA, R.G. Vantagens da recuperação e renovação de pastagens degradadas com a utilização de sistemas integrados de produção agropecuária. Revista Agro & Negócios, v.11, n.14, p.48-50, 2012.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

KOTTMANN, L. Rye (Secale cereale L.): agronomic performance under drought and methods of crop physiology to determine the drought tolerance of winter rye. Dissertation (Master in plant ecology and ecotoxicology), University of Hohenheim, 2015.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LEMAIRE, G.; CHAPMAN, D. Tissue flows in grazed plant communities. In: HODGSON, J., ILLIUS, A.W. (Eds.) The ecology and management of grazing systems. Guilford: CAB International, p.3-36, 1996.

LENIS-MANZANO, S. J.; DE ARAUJO, A. C. G.; DO VALLE, C. B.; DE FÁTIMA SANTANA, E.; DE CAMPOS CARNEIRO, V. T. Histologia da embriogênese somática induzida em embriões de sementes maduras de *Urochloa brizantha* apomítica. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 45, n. 5, p. 435-441, 2011.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da Água no Solo. Editora da Universidade de São Paulo, p.41-277, 2005.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Avaliação do desempenho de sonda de capacitância no monitoramento da umidade de latossolo do cerrado em condições de campo. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17,n.1, p.23-32, 2012.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Avaliação do desempenho de sonda de capacitância no monitoramento da umidade de latossolo do cerrado em condições de campo. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n.1, p.23-32, 2012.

LOPES, L.N.; SOUZA, C.F.; SANTORO, B.L. Utilização da TDR para monitoramento da solução de nitrato de potássio em Latossolo vermelho-amarelo. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.30, p.932-947, 2010.

MACHADO, S. L. M.; DE SALES, E. C. J.; REIS, S. T.; MESQUITA, V. G.; CARVALHO, Z. G.; MONÇÃO, F. P.; QUEIROZ, D. S. Forage accumulation, tillering and bromatological characteristics of Brachiaria grass under nitrogen fertilization. Científica, v. 45, n. 2, p. 197-203, 2017.

MANTOVANI, E. C. AVALIA: Programa de avaliação da irrigação por aspersão e localizada. Viçosa, MG: UFV, p. 77-80, 2001.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; NASSIF, D. S.; COSTA, L. G.; VIANNA, M. S.; CARVALHO, K. S. Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. Agricultural Water Management, v. 163, p. 139-145, 2016.

MARQUES, P. A. A.; JOSÉ, J. V.; DA ROCHA, H. S.; JÚNIOR, E. F. F. Consumo hídrico do manjericão por meio de lisímetro de drenagem. Irriga, v. 20, n. 4, p. 745-761, 2015.

MEIRELLES, M. L.; FRANCO, A. C.; FARIAS, S. E. M.; BRACHO, R. Evapotranspiration and plant–atmospheric coupling in a *Brachiaria brizantha* pasture in the Brazilian savannah region. Grass and Forage Science, v. 66, n. 2, p. 206-213, 2011.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A.; KOSEGARTEN, H.; APPEL, T. Nitrogen. In: Principles of plant nutrition. Springer, Dordrecht, p. 397-434, 2001.

MENTZER, J. T.; BIENSTOCK, C. C. The seven principles of sales-forecasting systems. Supply Chain Management Review, v. 34, n. 4, p. 76-83, 1998.

MITCHELL, P. J.; SIMPSON, A. J.; SOONG, R.; SIMPSON, M. J. Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil. Soil Biology and Biochemistry, v. 81, p. 244-254, 2015.

MOLAN, L. K. Estrutura do dossel, interceptação luminosa e acúmulo de forragem em pastos de Capim-Marandu submetidos a alturas de pastejo por meio de lotação contínua. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 159p, 2004.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

NEAL, J. S.; FULKERSON, W. J.; SUTTON, B. G. Differences in water-use efficiency among perennial forages used by the dairy industry under optimum and deficit irrigation. Irrigation Science, v. 29, n. 3, p. 213-232, 2011.

OLIVEIRA NETO, D.H.; CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M.; CEDDIA, M.B. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da beterraba orgânica sob cobertura morta de leguminosa e gramínea. Horticultura Brasileira, Brasília, v.29, p.330-334, 2011.

OLIVEIRA, F. D. A.; DE MEDEIROS, J. F.; DE OLIVEIRA, M. K.; SOUZA, A. A.; FERREIRA, J. A.; SOUZA, M. S. Interação entre salinidade e bioestimulante na cultura do feijão caupi. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 17, n. 5, 2013.

OLIVEIRA, I. N. D. Qualidade do solo utilizando diferentes coberturas e preparos do solo em área de cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 137p, 2018.

OLIVEIRA, L. A. A. Uso da técnica de reflectometria no domínio da frequência para estimativa de umidade em Latossolo Vermelho distroférrico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 114p, 2016.

OLIVEIRA, P. P. A.; PRIMAVESI, A. C.; CAMARGO, A. C. de. Recomendação da sobressemeadura de aveia forrageira em pastagens tropicais ou subtropicais irrigadas. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 7p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Comunicado Técnico, 61).

OLIVEIRA, P.P.A. Recuperação e reforma de pastagens. In: PEDREIRA, C.G.S.; MOURA, J.C. de; SILVA, S.C. da; FARIA, V.P. de. (Ed.). In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS. Anais. Piracicaba: FEALQ, p.39-73, 2007.

PLATINEANU, I. C.; STARR, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. Soil Science Society of America Journal, v. 61, n. 6, p. 1576-1585, 1997.

PAULA, C. C.; EUCLIDES, V. P.; MONTAGNER, D. B.; LEMPP, B.; DIFANTE, G. S.; CARLOTO, M. N. Estrutura do dossel, consumo e desempenho animal em pastos de capim-marandu sob lotação contínua. Arq. Bras. Med. Vet. Zootec, v. 64, n. 1, p. 169-176, 2012.

PEDREIRA, C. G. S.; TONATO, F.; LARA, M. A. S. Forrageiras: Brachiaria, Panicum e Cynodon. MONTEIRO, JEBA Agrometeorologia dos cultivos, o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, p. 427-447, 2009.

PEEK, M.S.; LEFFLER, A.J.; IVANS, C.Y.; RYEL, R.J.; CALDWELL, M.M. Fine root distribution and persistence under field conditions of three co-occurring Great Basin species of different life form. New Phytology, v.165, p.171-180, 2005.

PETERSON, A.M.; HELGASON, W.D.; IRESON, A.M. Estimating field-scale root zone soil moisture using the cosmic-ray neutron probe. Hydrology and Earth System Sciences, v. 20, n. 4, p. 1373-1385, 2016.

POSS, J. A.; RUSSELL, W. B.; SHOUSE, P. J.; AUSTIN, R. S.; GRATTAN, S. R.; GRIEVE, C. M.; ZENG, L. A volumetric lysimeter system (VLS): An alternative to weighing lysimeters for plant–water relations studies. Computers and Electronics in Agriculture, v. 43, n. 1, p. 55-68, 2004.

POSTIGLIONI, S. R. Comportamento da aveia, azevém e centeio na região dos Campos Gerais, PR. Londrina, IAPAR, 18p. Boletim técnico, IAPAR, n.14, 1982.

PROVENZANO, G.; RALLO, G.; GHAZOUANI, H. Assessing field and laboratory calibration protocols for the diviner 2000 probe in a range of soils with different textures. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 142, n. 2, 2015.

PÜTZ, T; FANK, J; FLURY, M. Lysimeters in vadose zone research. Vadose Zone Journal, v. 17, n. 1, 2018.

QI, Z.; HELMERS, M. J. Soil water dynamics under winter rye cover crop in central Iowa. Vadose Zone Journal, v. 9, n. 1, p. 53-60, 2010.

RAIJ, B. van; CATARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico; Fundação IAC, 1996. 258 p. (Boletim Técnico, 100).

RIBEIRO, M. S.; DA SILVA, E. L.; DE MOURA, D. C. M.; DANTAS, A. A. A. Coeficiente de cultura (Kc) e crescimento vegetativo de acaiá cerrado associados a graus-dia e desenvolvimento. Irriga, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 220-232, 2009.

RIGHI, E. Z. Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola). Universidade de São Paulo, 2004.

RODRIGUES, B. H. N.; ANDRADE, A. C.; MAGALHÃES, J. A.; BASTOS, E. A.; SANTOS, F. D. S. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do capim-Tanzânia. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011.

ROSO, C.; RESTLE, J. Aveia preta, triticale e centeio em mistura com azevém. Produtividade animal e retorno econômico. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 29, n. 1, p. 85-93, 2000.

SAFADOUSTA, A.; FEIZEEA, P.; MAHBOUBIB, A. A.; GHARABAGHIB, B.; MOSADDEGHIC, M. R.; AHRENSD, B. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. Agricultural Water Management, v. 136, n. 1, p. 34-41, 2014.

SALDIAS, B. N.; SEGUEL, O.; OVALLE, C.; ACEVEDO, E.; MARTÍNEZ, I. Tillage effects on the soil water balance and the use of water by oats and wheat in a Mediterranean climate. Soil and Tillage Research, v. 184, p. 68-77, 2018.

SALES, D. L. A. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial estimado por sensoriamento utilizando o algoritmo SAFER. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 65 p. 2016.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 190, p. 70-79, 2014.

SANCHES, A. C.; GOMES, E. P.; RICKLI, M. E.; FASOLIN, J. P.; SOARES, M. R.; DE GOES; R. H. Produtividade e valor nutritivo do capim Tifton 85 irrigado e sobressemeado com aveia. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental - Agriambi, v. 19, n. 2, 2015.

SANCHES,C.A. Coeficiente de cultura (Kc) e correlações de consumo de água, fatores produtivos e biométricos de gramíneas tropicais em cultivo exclusivo e em sobressemeadura com forrageiras de inverno. Tese de Doutorado. USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 165 p. Piracicaba. 2017.

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the swat model on a large rwer basin with point and nonpoint sources 1. JAWRA - Journal of the American Water Resources Association, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, 2001.

SANTOS, D. B. dos.; COELHO, E. F.; AZEVEDO, C. A. V. de. Absorção de água pelas raízes do limoeiro sob distintas frequências de irrigação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.3, p.327-333, 2005.

SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T.; ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.4, p.142-149, 2010.

SANTOS, K. S; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S.; FONTES JUNIOR, R.P.V . Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 828–835, 2012.

SBRISSIA, A. F.; SILVA, S. D. Comparação de três métodos para estimativa do índice de área foliar em pastos de capim-marandu sob lotação contínua. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 37, n. 2, p. 212-220, 2008.

SCHENK, H. J.; JACKSON, R. B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. Journal of Ecology, v. 90, n. 3, p. 480-494, 2002.

SCHMIDT, C. D. S.; PEREIRA, F. D. C.; OLIVEIRA, A. S.; JÚNIOR, J. F. G.; VELLAME, L. M. Design, installation and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. Water Resource Irrigation. Management, v. 2, p. 77-85, 2013.

SCHWARTZ, R. C.; CASANOVA, J. J.; BELL, J. M.; EVETT, S. R. A reevaluation of time domain reflectometry propagation time determination in soils. Vadose Zone Journal, v. 13, n. 1, 2014.

SENTEK. Calibration Manual: For Sentek Soil Moisture Probes. Stepney: Sentek Pty Ltd, 2011.

SILVA, B. M.; DE OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; DA SILVA JÚNIOR, J. J.; DE LIMA, J. M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, n. 2, p. 277-286, 2012.

SILVA, D. O. M. da. Validação de um sensor de determinação da umidade do solo para o manejo da irrigação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). 2013. 63 f. Universidade Federal do Vale do São Francisco.

SILVA, M. D. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. D. L.; GAVA, G. J.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, p. 241-249, 2014.

SMIT, A.L.; VAN NOORDWIJK, M.; BROUWER, G.; MEIJBOOM, F.; OLIVEIRA, M. D. R. G.; BENGOUGH, A. G. Trench profile techniques and core break methods. In: Root Methods. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. p. 211-233.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. Field Crops Research, v. 92, n. 2-3, p. 169-183, 2005.

SOLDEVILLA-MARTINEZ, M.; QUEMADA, M.; LÓPEZ-URREA, R.; MUNOZ-CARPENA, R.; LIZASO, J. I. Soil water balance: Comparing two simulation models of different levels of complexity with lysimeter observations. Agricultural Water Management, v. 139, p. 53-63, 2014.

SONCELA, R.; SAMPAIO, S. C.; VILAS BOAS, M. A.; TAVARES, M. H. F.; SOUZA, C. F.; SONCELA, A. S. Condutividade elétrica do solo irrigado com água residuária da suinocultura estimado pelo domínio do tempo reflectometria. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, v.35, p.1293-1300, 2011.

SOUSA, A.; MATSURA, E. E.; ELAIUY, M. L.; DOS SANTOS, L. N.; MONTES, C. R.; PIRES, R. C. D. M. Root system distribution of sugarcane irrigated with domestic sewage effluent aplication by subsurface drip system. Engenharia Agrícola, v. 33, n. 4, p. 647-657, 2013.

SOUZA, A.F.; JÚNIOR, J.H.C. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para região da Baixada Cuiabana, MT. Agrometeoros, v. 25, n. 2, 2018.

SOUZA, C. F.; da SILVA, R.C.; ANDRADE JUNIOR, S.A.; COELHO, E.F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. Irriga, v. 1, n. 1, p. 26-42, 2016.

SOUZA, C.; da SILVA, C. R.; de ANDRADE JUNIOR, A. S.; COELHO, E. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. Embrapa Meio-Norte-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2016.

SOUZA, C.F.; FOLEGATTI, M.V. Spatial and temporal characterization of water and solute distribution patterns. Scientia Agricola, Piracicaba, v.67, p.9-15, 2010.

SOUZA, P.D. Consumo de água, relações hídricas e biométricas em dois sistemas de cultivo irrigado de *Urochloa brizantha* (Syn. *Brachiaria brizantha*) cv. Marandu. Dissertação de Mestrado. USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 145 p. Piracicaba/SP. 2017.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; SPINELLI PINTO, L. F.; ALVES BRITO PINTO, M.; ALDRIGHI DUTRA JUNIOR, L.; SCHEUNEMANN, T. Sistema radicular da *Urochloa brizantha*: desenvolvimento e influência nos atributos de um solo degradado. Interciencia, v. 41, n. 5, 2016.

TERUEL, D. A.; DOURADO NETO, D.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K. Modelagem matemática como metodologia de análise do crescimento e arquitetura de sistemas radiculares. Scientia Agrícola, v. 57, n. 4, p. 683-691, 2000.

TILMAN, D.; BALZER, C., HILL, J., & BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 108, n. 50, p. 20260-20264, 2011.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic Determination of Soil Water Content Using TDR: II. Evaluation of Installation and Configuration of Parallel Transmission Lines 1. Soil Science Society of America Journal, v. 46, n. 4, p. 678-684, 1982.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. Soil science society of America journal, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

Van GENUCHTEN, M.T.; SIMUNEK, J.; LEIJ, F.J. & SEJNA, M. RETC version 6.02. Disponível em: <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc-downloads>. Acesso em 4 out. 2019

VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. Transactions of the ASAE, v. 46, n. 6, p. 1539, 2003.

VASCONCELOS, A. C. M.; DINARDO-MIRANDA, L. L. Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematoides. Americana: Adonis. P, v. 56, 2011.

VAUGHAN, P. J.; AYARS, J. E. Noise reduction methods for weighing lysimeters. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 135, n. 2, p. 235-240, 2009.

VELOSO, A. L. C. Pastagem irrigada de *Panicum maximum* jacq cv Tanzânia adubada com fósforo e nitrogênio sobre a produção, valor nutritivo e atributos do solo no norte de Minas Gerais. Tese (Doutorado em Zootecnia). 2012. 90 f. Universidade Federal de Minas Gerais.

VIONE, M. T. Modelagem matemática da evaporação da água do solo. 2007. 76 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Departamento de Física, Estatística e Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijuí.

VIONE, M. T. Modelagem matemática da evaporação da água do solo. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Departamento de Física, Estatística e Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijuí, 76 p. 2007.

WANG, N; ZHANG, N; WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry -Recent development and future perspective. Computers and Electronics in Agriculture, v.50, p.1–14. 2006.

WARD, P. R.; FLOWER, K. C.; CORDINGLEY, N.; WEEKS, C.; MICIN S. F. Soil water balance with cover crops and conservation agriculture in a Mediterranean climate. Field Crops Research, v.132, p.33-39, 2012.

WELLES, J. M.; NORMAN, J. M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. Agronomy Journal, v. 83, n. 5, p. 818-825, 1991.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. Physical geography, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

YE, S.; YANG, Y.; XIN, G.; WANG, Y.; RUAN, L.; YE, G. Studies of the Italian ryegrass–rice rotation system in southern China: Arbuscular mycorrhizal symbiosis affects soil microorganisms and enzyme activities in the *Lolium mutiflorum* L. rhizosphere. Applied Soil Ecology, v. 90, p. 26-34, 2015.

ZHANG, Y.; KENDY, E.; QIANG, Y.; CHANGMING, L.; YANJUN, S.; HONGYONG, S. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. Agricultural Water Management, v. 64, n. 2, p. 107-122, 2004.

ZOUGMORÉ, R.; MANDO, A.; STROOSNIJDER, L. Effect of soil and water conservation and nutrient management on the soil–plant water balance in semi-arid Burkina Faso. Agricultural Water Management, v. 65, n. 2, p. 103-120, 2004.