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

Medição da temperatura do dossel da cana-de-açúcar por sensores de
infravermelho fixados no pivô central

Luciano Sobral Fraga Junior

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

Piracicaba
2021

Luciano Sobral Fraga Junior
Engenheiro Agrônomo

**Medição da temperatura do dossel da cana-de-açúcar por sensores de infravermelho
fixados no pivô central**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS VINICIUS FOLEGATTI**

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

Piracicaba
2021

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

Fraga Junior, Luciano Sobral

Medição da temperatura do dossel da cana-de-açúcar por sensores de infravermelho fixados no pivô central / Luciano Sobral Fraga Junior. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011 - - Piracicaba, 2021.

87 p.

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

1. Temperatura foliar 2. Irrigação 3. Estresse hídrico 4. Transpiração I.
Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Luciano e Sandra.

À minha avó Maria.

Às minhas irmãs Elís Marina e Laisa Fraga.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter me concedido força, saúde, perseverança e sabedoria em todos os momentos dessa trajetória e em toda a minha vida.

Aos meus pais Luciano e Sandra, que me incentivaram e me apoiaram, por toda educação e amor que me proporcionam ao longo de toda a minha vida e por me concederem todas as condições para que eu conseguisse concluir esta etapa tão importante em minha vida.

À minha avó Maria Fraga por todo amor e conselhos concedidos.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em especial ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, por toda infraestrutura e pela oportunidade de cursar o doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao professor Marcos Vinícius Folegatti, pela orientação, confiança e por me proporcionar a chance de vencer mais uma etapa em minha vida.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, aos quais ofereço meus singelos agradecimentos por todo o conhecimento compartilhado.

Aos funcionários Beatriz Regina Duarte Novaes, Gilmar Batista Grigolon, Luis Custódio Camargo, Davilmar Aparecida Colevatti, Paula Alessandra Bonassa Pedro, Francisco de Oliveira (Chicão), Áureo Santana de Oliveira, Agnaldo Ferraz Degaspari, Lino Stênico, Angela Márcia Derigi Silva, pela paciência e grande apoio concedido por todos esses anos.

Ao professor Dr. Lucas Melo Vellame pela confiança depositada, orientação na graduação e mestrado, sobretudo pela amizade. Pelos valiosos conselhos e ensinamentos e conhecimentos compartilhados que proporcionaram meus primeiros passos na área acadêmica.

Aos amigos e colegas de pós-graduação, em especial para Rubmara Ketzer Oliveira, Tércio Rocha Lopes, Larissa Bretas Moura, Otávio Neto, Alex Zanchet Bordignon, Lucas Camargo Antedomenico, Wagner Wolff por todos os bons momentos vividos e pela troca de aprendizado.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

*“Estudamos pelo deleite de tão somente
confirmar nossa retumbante ignorância.”.*

Flávio Arthur Sobrinho Fernandes “Ravel”

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. A cultura da cana de açúcar	17
2.2. Irrigação da cana de açúcar	18
2.3. Irrigação de precisão.....	20
2.4. Temperatura foliar	21
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1. Descrição da área experimental	25
3.2. Análise físico-hídrica e química do solo.....	26
3.3. Preparo da área e plantio.....	28
3.4. Manejo da irrigação	30
3.5. Medição da temperatura foliar.....	32
4. RESULTADOS	41
4.1. Evapotranspiração da cultura	41
4.2. Irrigação	42
4.3. Calibração dos sensores de infravermelho	42
4.4. Índice de área foliar	44
4.5. Calibração de campo	44
4.6. Temperatura do dossel por sensores instalados no pivô central	56
5. CONCLUSÕES.....	76
REFERÊNCIAS.....	78

RESUMO

Medição da temperatura do dossel da cana-de-açúcar por sensores de infravermelho fixados no pivô central

A cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis no Brasil. Para aumentar a produtividade e garantir a longevidade dos canaviais o manejo da água é essencial. Uma das principais técnicas utilizadas para o monitoramento do estresse hídrico das culturas agrícolas, é a medição da temperatura foliar, que tem relação direta com a transpiração, que produz resfriamento da folha em relação ao ar adjacente, quando a planta está bem suprida por água no solo. O objetivo deste trabalho foi determinar a temperatura do dossel e do solo em um cultivo de cana de açúcar, utilizando sensores de infravermelho com diferentes ângulos de visão fixados no pivô central e avaliar a distribuição espacial da temperatura obtida enquanto o pivô se desloca na área cultivada com cana de açúcar. O trabalho foi desenvolvido com cana-de-açúcar da cultivar RB867515 em uma área de 1,0 ha irrigada por pivô central. Para medir a temperatura do dossel foram utilizados sensores da temperatura por infravermelho com ângulos de visada de 35° e 15° e para a aquisição de dados destes sensores foi montado um sistema de medição em plataforma Arduino (Open Source). Foi montada uma estação fixa de monitoramento da temperatura localizada no interior do canavial para calibração dos sensores em campo. Os dados de temperatura apresentaram valores maiores que os obtidos por termopar nos 4 primeiros meses de cultivo da cana de açúcar, apresentando gradativa redução até próximo à temperatura do ar quando a cana alcançou IAF médio de 2,67. A temperatura do dossel quando a cana de açúcar tinha IAF médio maior que 2,67 foi menor que a temperatura do ar ao meio dia. Os sensores de infravermelho com ângulo de visão de 15° apresentam valores maiores de temperatura. Em função do deslocamento do pivô, é necessário a modelagem da temperatura utilizando superfície de referência para minimizar a variação temporal e padronizar a temperatura obtida ao longo do deslocamento do pivô para uma medida instantânea

Palavras-chave: Temperatura foliar, Irrigação, Estresse hídrico, Transpiração

ABSTRACT

Measurement of leaf temperature of sugar cane by infrared sensors attached to the center pivot

Sugarcane is considered one of the great alternatives for the biofuels sector in Brazil. To increase productivity and guarantee the longevity of the cane fields, water management is essential. One of the main techniques used to monitor the water stress of agricultural crops is the measurement of leaf temperature, which is directly related to transpiration, which produces leaf cooling in relation to the surrounding air, when the plant is well supplied with water in the ground. The objective of this work was to determine the canopy and soil temperature in a sugarcane cultivation, using infrared sensors with different viewing angles fixed on the central pivot and to evaluate the spatial distribution of the temperature obtained while the pivot moves in the cultivated area with sugar cane. The work was carried out with sugar cane of the cultivar RB867515 in an area of 1.0 ha irrigated by a central pivot. In order to measure the temperature of the canopy, infrared temperature sensors with viewing angles of 35 ° and 15 ° were used and for the acquisition of data from these sensors, an Arduino platform measurement system (Open Source) was set up. A fixed temperature monitoring station located inside the cane field was set up to calibrate the sensors in the field. The temperature data showed higher values than those obtained by thermopomars in the first 4 months of sugarcane cultivation, showing a gradual reduction until close to the air temperature when the cane reached an average LAI of 2.67. Canopy temperature when sugarcane had an average LAI greater than 2.67 was lower than midday air temperature. Infrared sensors with a 15° angle of view have higher temperature values. Due to the pivot displacement, it is necessary to model the temperature using a reference surface to minimize the temporal variation and standardize the temperature obtained along the pivot displacement for an instantaneous measurement.

Keywords: Leaf temperature, Water stress, Irrigation, Transpiration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área experimental na Fazenda Areão.....	25
Figura 2. Remoção de Pinhão manso da área experimental utilizando retroescavadeira (A), plantas de pinhão manso removidas (B), retirada de pinhão manso cultivado nos lisímetros de pesagem (C) e área experimental (D).	26
Figura 3. Escavação para instalar cabo dos lisímetros de pesagem (A), solo da área experimental após escarificação (B), formação de sulcos e adubação (C) e plantio de cana de açúcar (D).	29
Figura 4. Área experimental com cana de açúcar em estágio de brotação e estabelecimento (A), perfilhamento e crescimento (B e C) e máximo desenvolvimento (D).	30
Figura 5. Estação meteorológica da Fazenda Areão com superfície gramada.....	32
Figura 6. Diagrama eletrônico do datalogger em plataforma Arduino (A), Detalhes do datalogger montado em plataforma Arduino (B).	34
Figura 7. Trajetória de leitura de temperatura dos sensores de infravermelho instalados no pivô central.	35
Figura 8. Suporte do sensor de temperatura por infravermelho (A), sensor de temperatura por infravermelho por dentro do tubo de aço inoxidável (B).	36
Figura 9. Instalação de hastes de sustentação e cabeamento para o sistema de medição (A), caixa contendo bateria estacionária e painel solar para alimentação do Sistema (B), dataloggers e sensores de infravermelho instalados no pivô (C) e detalhe de um sensor instalado (D).	37
Figura 10. Estação de medição fixa da temperatura do dossel e do solo utilizando sensores de infravermelho e termopares para coleta de temperatura da folha da cana de açúcar.	38
Figura 11. Sensor de infravermelho direcionado para o calibrador de corpo negro.....	39
Figura 12. Curso da evapotranspiração de referência (ET _o) e evapotranspiração da cultura (ET _c) ao longo do experimento.....	41
Figura 13. Distribuição de chuvas, irrigação e armazenamento de água no solo ao longo do período experimental.	42
Figura 14. Curso diário da temperatura da folha da cana de açúcar medida por doze termopares nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).	47
Figura 15. Curso diário da temperatura média da folha da cana de açúcar medida por doze termopares, da temperatura do ar, e da temperatura do dossel e do solo obtidas pelos sensores de temperatura por infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).	49
Figura 16. Relação entre a temperatura média medida pelos sensores de infravermelho direcionados para o dossel e a temperatura média obtida dos termopares nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de maio de 2019 (F).	52
Figura 17. Relação entre a temperatura média medida pelos sensores de infravermelho direcionados para o solo e a temperatura média obtida dos termopares nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de maio de 2019 (F).	54
Figura 18. Curso da temperatura do dossel medida ao amanhecer por sensores de infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).	58
Figura 19. Curso da temperatura do solo medida ao amanhecer por sensores de infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).	59

Figura 20. Curso da temperatura do dossel medida ao meio dia por sensores de infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).	63
Figura 21. Curso da temperatura do solo medida ao meio dia por sensores de infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).	64
Figura 22. Temperatura do dossel do canavial medida ao amanhecer por sensores de infravermelho com ângulo de visão de 35° instalados no pivô central.	67
Figura 23. Temperatura do dossel do canavial medida ao meio dia por sensores de infravermelho com ângulo de visão de 35° instalados no pivô central.....	68
Figura 24. Temperatura do solo do canavial medida ao amanhecer por sensores de infravermelho com ângulo de visão de 35° instalados no pivô central.....	69
Figura 25. Temperatura do solo do canavial medida ao meio dia por sensores de infravermelho com ângulo de visão de 35° instalados no pivô central.....	70
Figura 26. Temperatura do dossel do canavial medida ao amanhecer por sensores de infravermelho com ângulo de visão de 15° instalados no pivô central	71
Figura 27. Temperatura do dossel do canavial medida ao meio dia por sensores de infravermelho com ângulo de visão de 15° instalados no pivô central.....	72
Figura 28. Temperatura do solo do canavial medida ao amanhecer por sensores de infravermelho com ângulo de visão de 15° instalados no pivô central.....	73
Figura 29. Temperatura do solo do canavial medida ao meio dia por sensores de infravermelho com ângulo de visão de 15° instalados no pivô central.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição mineralógica e classe textural, densidade do solo e densidade de partículas do solo de cada camada de solo amostrada da área do experimento.....	27
Tabela 2. Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten, densidade do solo e capacidade de água disponível (CAD) em cada camada de solo amostrada.	28
Tabela 3. Análise química do solo da área do experimento em cada camada de solo amostrada.	28
Tabela 4. Equação de calibração dos sensores de temperatura por infravermelho (modelo MLX90614) em função da temperatura do corpo negro e seus respectivos coeficientes de correlação (R^2), raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios (RMSE) e Erro médio absoluto (MAE).....	43
Tabela 5. Índice de área foliar do canavial nas seis linhas de medição de temperatura.....	44
Tabela 6. Probabilidade de significância ($P > t$) para o teste t das as médias de temperatura do dossel e do solo.	56
Tabela 7. Temperatura média ao amanhecer medida por sensores de infravermelho instalados no pivô central, nas linhas de cultivo do canavial.	60
Tabela 8. Temperatura média ao meio dia medida por sensores de infravermelho instalados no pivô central, nas linhas de cultivo do canavial.	65

1. INTRODUÇÃO

A agroindústria sucroalcooleira nacional é considerado uma grande alternativa para o setor de biocombustíveis devido ao grande seu grande potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos. O setor é diferentemente do que ocorre nos demais países, opera numa conjuntura positiva e sustentável (Marin et al., 2016).

A área total de cana-de-açúcar colhida nessa safra foi de 8.442 mil hectares, representando uma redução de 1,7% em relação à última temporada. O estado de São Paulo, maior produtor nacional, teve diminuição de área em produção na ordem de 2,8% em comparação a 2018/19. Sendo que grande parte desses 123,9 mil hectares reduzidos foram em área de fornecedores (Censo Varietal Ridesa, 2019).

No Brasil, o cultivo da cana de açúcar desempenha grande importância socioeconômica, uma vez que é uma grande fonte de empregos e renda para o país, gerando produtos tanto para o consumo interno como para exportação. Seu cultivo é destinado principalmente para a produção de açúcar e para a produção de etanol o que faz da cultura uma grande alternativa para o setor de biocombustíveis.

O Brasil produziu na safra 20/21 cerca de 665,1 milhões de toneladas de cana de açúcar, em uma área total colhida de 9,7 milhões de hectares. Esses dados representam um acréscimo de aproximadamente 3,5% da produção, o que faz do Brasil um país de destaque no cenário mundial como produtor de cana de açúcar. A crescente demanda mundial por etanol proveniente de fontes renováveis bem como a enorme quantidade de áreas com condições edafoclimáticas favoráveis para expansão da cultura no país, colocam o Brasil em uma condição promissora tanto como exportador dos seus produtos quanto em desenvolvimento de tecnologia e de manejo da cultura (CONAB, 2021).

Contudo, ainda que o Brasil possua uma grande extensão territorial e grande quantidade de áreas favoráveis para a expansão de cana de açúcar, um dos fatores limitantes para que isto ocorra é a disponibilidade hídrica. A demanda por água doce tem aumentado em todo o mundo devido ao crescimento econômico e populacional (Organização das Nações Unidas (FAO), 2016) o que vem causando cada vez mais conflitos entre os diversos usuários destes recursos (Elmaloglou et al., 2014). Nas últimas décadas têm sido realizadas intensas discussões em torno das mudanças climáticas e das incertezas associadas a disponibilidade de recursos hídricos em diversos lugares do globo terrestre. Este cenário é desafiador ao planejamento e uso

racional dos recursos hídricos por diversos setores produtivos, incluindo a agricultura irrigada. Como forma de atender à crescente demanda por etanol e açúcar, o Brasil pode aumentar a sua produção e promover maior segurança produtiva por meio do cultivo irrigado, podendo suprir de forma plena a demanda hídrica da cultura em áreas consideradas críticas, ou mesmo complementar o requerimento de água em locais há má distribuição de chuvas.

Segundo Manzatto et al. (2009), grande parte da área de cultivo futuro de cana de açúcar ocorrerá em áreas de pastagens degradadas, principalmente na região centro-oeste, onde é necessária a utilização da irrigação. No nordeste brasileiro, principalmente nas condições climáticas de áreas onde se encontram os tabuleiros costeiros, os cultivos de cana de açúcar requerem o uso de irrigação complementar como forma de evitar ou reduzir a necessidade de renovação precoce do canavial (Farias et al., 2008). No estado de Alagoas, as áreas de expansão para cultivos de cana de açúcar são limitadas o que aumenta a necessidade de utilização de tecnologias, como a irrigação, para o aumento da produtividade (Ferreira Junior et al., 2014). Outras regiões produtoras no país também tendem para implantação de sistemas de irrigação à médio e longo prazo (Marin et al., 2016).

Apesar dos benefícios da irrigação, observa-se que muitas vezes o seu manejo é inadequado. Via de regra a irrigação em excesso desperdiça recursos naturais podendo causar danos ao ambiente pela lixiviação de nutrientes do solo que promovem contaminação dos mananciais hídricos. Por outro lado, a sub-irrigação pode causar déficit de água no solo e redução da produtividade da cultura. Estratégias como a irrigação de salvamento e a imposição de deficiência hídrica no período de maturação com irrigação plena se mostram necessárias na produção de cana de açúcar. O manejo da irrigação nessas condições deve ser bastante acurado para evitar grandes perdas de produtividade e para tanto é importante o uso de modernas metodologias de monitoramento e controle.

Um dos principais problemas relacionado ao manejo da cultura é a variabilidade espacial das características ambientais. Em muitas áreas é conhecida a variabilidade das propriedades edafoclimáticas para que a mesma área seja tratada inteira como uniforme. Como resultado os insumos são incorretamente aplicados em áreas consideradas homogêneas, causando o uso ineficiente dos recursos. A automação é umas das ferramentas possíveis para otimizar o uso da água na irrigação. Muitos sistemas automáticos estão funcionando em campos de irrigação

brasileiros. Todavia, o que se vê na prática é o uso de controladores importados, e geralmente dedicados, que controlam apenas os mecanismos de aplicação da água, não considerando regras de manejo para a tomada de decisão (Queiroz, 2007).

Em pivô central tem-se determinado a temperatura do dossel com uso de sensores de temperatura por infravermelho, montados na linha de pivô central para monitoramento de stress nas plantas (Michels et al., 1999; O'Shaughnessy et al. 2010; O'Shaughnessy et al. 2011; Bitella et al. 2014; Sui & Baggard 2018; Peter & Evett 2004). Um sistema de aquisição de dados com tempo de leitura ajustado ao sistema de posicionamento do pivô provê informações que podem gerar mapas de temperatura do dossel da cultura. Esses mapas podem ser utilizados para vários propósitos, como por exemplo, observar danos em stands nas lavouras causados por deficiência hídrica, ataque de pragas e doenças, falha na semeadura, manchas de solo, etc. (Toler et al., 1981; Jackson, 1986; Pozdnyakova et al., 2002; Nixon et al., 1975). Os termômetros infravermelhos portáteis são capazes de medir a temperatura do dossel em pequena escala com alta resolução espacial (Evans et al., 2000; Sadler et al., 2002; Bockhold et al., 2003; Sepulcre-Cantó et al., 2006).

Os sensores por infravermelho econômicos com saídas analógicas e digitais estão prontamente disponíveis no mercado e têm sido usados na indústria automobilística e médica, mas existem poucos estudos sobre esses sensores em ambientes agrícolas (Mahan & Yeater, 2008; Mahan et al. 2010).

O objetivo deste trabalho foi determinar a temperatura do dossel e do solo em um cultivo de cana de açúcar, utilizando sensores de infravermelho fixados no pivô central. Os objetivos específicos foram:

- Calibrar os sensores de infravermelho em campo em relação a medições diretas por termopares;

- Comparar sensores com diferentes ângulos de visada;

- Avaliar a distribuição espacial da temperatura obtida enquanto o pivô se desloca na área cultivada com cana de açúcar.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma planta tropical de porte alto e com metabolismo C4 que pertence à família Poaceae e se caracteriza por elevada taxa fotossintética, apresentando, por isso, alta produtividade biológica (Irvine, 1980). É uma cultura de alto valor econômico para o Brasil e para o mundo devido à sua utilização na produção de açúcar, etanol e energia elétrica. Um dos fatores que mais afetam a sua produtividade agroindustrial é o déficit hídrico causado pela irregularidade de chuvas em algumas regiões brasileiras, dentre as quais se destaca a região Nordeste (Silva et al., 2012).

Os elementos meteorológicos influenciam o desenvolvimento da cultura ao longo de todo o ciclo vegetativo. A temperatura do ar, a radiação solar e a precipitação pluviométrica são os principais fatores que mais interferem no desenvolvimento da cultura e na sua exploração econômica (Alfonsi et al., 1987). De acordo com Inman-Bamber (2004), em plantas bem supridas com água a evapotranspiração pode aumentar em condições de elevadas temperaturas, mas, quando sob estresse hídrico, a temperatura alta causa redução na área foliar e no crescimento dos perfilhos, além de estimular a senescência de folhas. O seu ciclo fenológico da completa-se em aproximadamente de 11 a 22 meses e necessita de um período quente e úmido para brotar, emergir, perfilhar e outro relativamente seco e/ou frio para a maturação (Brunini, 2010).

Segundo Sinclair et al. (2004), o crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar são relacionados com a temperatura do ar em cada estágio de desenvolvimento. Esse comportamento também foi observado no trabalho de Bonnett (1998), ao relatar que em baixas temperaturas do ar, inferiores a 8°C, o desenvolvimento das folhas de algumas cultivares foi prejudicado. Sinclair et al. (2004), ao estudarem o efeito das temperaturas mínimas ideais para o desenvolvimento das folhas, encontraram limites diferentes de temperatura para cada cultivar avaliada, tendo observado que a temperatura base para desenvolvimento foliar estaria em torno de 10°C, variando conforme a cultivar. Inman-Bamber (2004) cita que as temperaturas elevadas em períodos de estresse hídrico causam a diminuição da área foliar, pois aceleram o processo de senescência das folhas verdes.

O crescimento é desprezível sob temperatura acima de 38°C (Inman-Bamber, 1994; Barbieri; Villa Nova, 1977; Doorembos; Kassam, 1994).

De acordo com Gascho e Shih (1983), pode-se considerar quatro fases fenológicas para a cultura da cana de açúcar, entre elas a brotação e emergência, o perfilhamento e estabelecimento da cultura, o crescimento dos colmos e a maturação dos colmos. De acordo com os autores, na brotação e emergência a cultura é mais exigente em temperatura e umidade para iniciar as atividades meristemáticas, resultando no desenvolvimento das raízes do tolete e a emergência de um pequeno broto na superfície do solo, que ocorre geralmente após 20 a 30 dias do plantio. No perfilhamento e estabelecimento da cultura, as gemas localizadas na base do colmo primário se intumescem, observando novos brotos, aproximadamente de 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário. Em função da concorrência pelos fatores limitantes do meio, sobretudo luminosidade, cessa-se esta fase e os colmos mais jovens chegam inclusive a morrer.

Durante a fase de crescimento dos colmos os perfilhos sobreviventes prosseguem seu crescimento e desenvolvimento, ganhando altura e iniciando o acúmulo de açúcares da base em direção ao ápice da planta. Nesta fase, o sistema radicular encontra-se bem desenvolvido, tanto nas laterais quanto em profundidade. O canavial pode atingir altura acima de três metros, com a população final de colmos, variando em função das condições de clima e solo. A fase final, maturação dos colmos, inicia-se junto com o crescimento intenso dos colmos sobreviventes do perfilhamento das touceiras. À medida que vão amadurecendo, os colmos continuam o seu crescimento e desenvolvimento, acumulando cada vez mais sacarose em seus internódios. Ao atingir o seu tamanho final, constituem-se colmos industrializáveis, passando a acumular mais intensamente a sacarose produzida pela fotossíntese.

2.2. Irrigação da cana-de-açúcar

A irrigação da cana de açúcar é uma prática que tem elevado a produtividade da cultura e também o seu custo de produção; por isso, a quantidade de estudos relacionados ao consumo de água pela cultura e ao uso de recursos hídricos para a irrigação vem-se tornando cada vez mais frequentes (Teodoro et al., 2013). Muitas pesquisas têm concluído que o déficit de irrigação pode aumentar a receita líquida das fazendas (Frizzone et al, 2001, Ali et al, 2007); porém, de acordo com Coelho (2007),

a irrigação da cana-de-açúcar em pequenas e médias áreas, com nível tecnológico intermediário é economicamente menos atrativa, uma vez que os custos de implantação do sistema são muito altos frente aos pequenos aumentos de produtividade obtidos. Contudo, o autor ressalta que, em grandes áreas, sobretudo em usinas que utilizam mais tecnologia as vantagens de tais sistemas são mais evidentes.

De acordo com Frizzzone (2007), para auxiliar a formulação de calendários e o manejo da irrigação na cultura da cana de açúcar, as pesquisas têm sido realizadas sob quatro enfoques: irrigação total, irrigação suplementar, irrigação com déficit e irrigação de “salvação”. Via de regra, a irrigação em excesso desperdiça recursos naturais podendo causar danos ao ambiente pela lixiviação de nutrientes do solo que promovem contaminação dos mananciais hídricos.

Por outro lado, a sub-irrigação pode causar déficit de água no solo e redução da produtividade da cultura. Estratégias como a irrigação de salvamento que consiste na aplicação de uma lâmina mínima para garantir boa brotação da socaria e a imposição de deficiência hídrica no período de maturação com irrigação plena se mostram necessárias na produção de cana de açúcar. Porém, para a realização dessas práticas é necessário um nível mínimo de uso de tecnologias de monitoramento da água no solo, na planta e na atmosfera, além de sistemas eficientes controle de aplicação de água no solo aliado a um bom conhecimento teórico e técnico para sua utilização adequada.

Os estresses abióticos, como a deficiência hídrica, limitam a produtividade vegetal, haja vista serem considerados problemas eminentes para a agricultura, e reduzem significativamente os rendimentos das lavouras, além de restringir as latitudes e os solos nos quais espécies comercialmente importantes podem ser cultivadas (Mittler, 2006). De acordo com Ramesh & Mahadevaswamy (2000), a disponibilidade hídrica do solo é um dos fatores ambientais que mais influenciam a produção da cana-de-açúcar pois determina o estabelecimento da cultura durante o estágio vegetativo. Segundo Soares et al. (2004), os danos causados pela deficiência hídrica na cultura dependem da intensidade e da duração do período de déficit, da fase de desenvolvimento da cultura em que ocorre e da variedade cultivada.

Comprovadamente, durante o desenvolvimento da cultura a deficiência hídrica promove a restrição dos processos fisiológicos, principalmente durante o estágio inicial da cultura, prejudicando processos de divisão e alongamento celular,

os quais determinam a redução do acúmulo de massa seca, da taxa de crescimento da cultura e do índice de área foliar (Inman-Bamber & Smith, 2005; Trentin et al., 2011; Silva et al., 2011).

Em face a esses aspectos de crescimento e produção da cultura, estudos de análise de crescimento têm sido conduzidos, com o objetivo de melhorar o entendimento da influência dos elementos meteorológicos e do estresse hídrico no rendimento final da cana, podendo auxiliar a seleção de cultivares mais adaptadas a ambientes de produção específicos, bem como viabilizar o uso de práticas de manejo de irrigação mais adequadas a cada caso (Oliveira et al., 2010; Zhao et al., 2010; Oliveira et al., 2011).

2.3. Irrigação de precisão

De acordo com Nascimento et al. (2014), a agricultura tradicional tem adotado estratégias de manejo com base nas médias observadas dentro da área de cultivo, considerando-as, assim, como homogêneas. Ao desconsiderar a variabilidade espacial que ocorre naturalmente nas áreas agrícolas, submetendo essas a situações de super ou subestimação de suas reais necessidades, pode-se incorrer no erro da aplicação inadequada de insumos, o que resulta em perdas econômicas e degradação ambiental. Segundo Coelho Filho et al. (2001), a utilização da descrição espacial das variáveis mais importantes no manejo da irrigação auxilia o manejo mais racional de água na área, e o controle local pode ser realizado após a subdivisão da área, em zonas mais homogêneas. A evapotranspiração é um importante componente para o manejo da irrigação, e que apresenta variabilidade espacial e temporal em áreas de cultivos extensos.

O desenvolvimento de metodologias para estimativa da evapotranspiração em grandes áreas irrigadas tem auxiliado o manejo racional da irrigação. Contudo, o manejo em grandes áreas é um desafio, dada a dificuldade na aquisição de dados que representem adequadamente a heterogeneidade dos atributos ambientais. Nesse contexto, o uso de imagens de satélite representa grande avanço e possibilita diversas aplicações na agricultura.

O monitoramento da temperatura foliar é uma ferramenta importante para monitorar o estresse hídrico das culturas (WANG et al, 2010). Ao se medir as temperaturas do ar acima do dossel e a da parte aérea de uma cultura, pode-se

determinar um diferencial de temperatura, que se correlaciona com o consumo hídrico das culturas. Em pivô central tem-se determinado a temperatura do dossel com uso de sensores de temperatura por infravermelho, montados na linha de pivô central para monitoramento de stress nas plantas (MICHELS et al., 1999). Um sistema de aquisição de dados com tempo de leitura ajustado ao sistema de posicionamento do pivô provê informações que podem gerar mapas de temperatura do dossel da cultura. Esses mapas podem ser utilizados para vários propósitos, como por exemplo, observar danos em stands nas lavouras causados por deficiência hídrica, ataque de pragas e doenças, falha na semeadura, manchas de solo, etc. (Toler et al., 1981; Jackson, 1986; Pozdnyakova et al., 2002; Nixon et al., 1975). O uso de imagens de infravermelho tem como principal vantagem a rápida e fácil aquisição de dados das lavouras, e a obtenção de dados em tempo real, desafio hoje enfrentado pelos equipamentos comerciais disponíveis. A técnica se baseia na medição da temperatura da folha que é um importante indicador de stress hídrico podendo ser de grande utilidade para um gerenciamento eficiente da irrigação.

2.4. Temperatura foliar

A transpiração vegetal é um componente do balanço de energia que determina a temperatura foliar de acordo com fatores anatômicos das folhas (dimensões, pigmentação e massa), fatores do ambiente (radiação solar, velocidade do ar, temperatura e umidade relativa do ar) e fatores biológicos que determinam o número e a distribuição dos estômatos (Monteith & Unsworth, 1990; Leuzinger et al., 2010). A temperatura foliar pode ser tomada como um indicador do status hídrico da cultura, pelo fato de que a medida que a água se torna um fator limitante as plantas fecham seus estômatos, reduzindo a transpiração, culminando na redução do resfriamento e conseqüentemente no aumento da temperatura do dossel vegetativo pela absorção da radiação incidente (Jackson, 1982).

Nas últimas décadas, novas abordagens para a detecção da condição hídrica da planta foram propostas, entre elas o uso da termometria infravermelha (Lebourgeois et al., 2010). A termometria por infravermelho é um método indireto de medição da temperatura da parte superior do dossel vegetativo sem contato físico e utilizado para a determinação do estresse hídrico da cultura e a estimativa da sua evapotranspiração (Trentin, 2010; Carvalho, 2017).

A principal hipótese que envolve esta metodologia de determinação do estresse é que a transpiração foliar dissipa o calor acumulado na folha e neste processo a temperatura da folha diminui em relação à temperatura do ar, o que indica que a planta está em condições adequadas de suprimento de água no solo.

A condição contrária ocorre quando o conteúdo de água no solo está reduzido, ou seja, quando a transpiração é interrompida por causa da restrição de água no solo, a temperatura foliar tende a aumentar devido ao acúmulo de calor na folha, podendo apresentar valores maiores que a temperatura do ar adjacente (JACKSON, 1982), permitindo estimar o rendimento das culturas (Pinter et al., 1983; Irmak et al., 2000; Ajayi & Olufayo, 2004) e estimar fluxos de calor latente e sensível que são importantes parâmetros para modelos de estimativa da evapotranspiração (Kustas e Norman, 1996; Kalma & Jupp, 1990; Kalma, 2008).

Devido à sua praticidade e rapidez na determinação da temperatura, os termômetros de infravermelho têm sido amplamente utilizados na pesquisa agrícola para medir remotamente a temperatura das superfícies e determinar ou desenvolver índices de estresse hídrico (Jackson et al., 1981; Colaizzi et al., 2010), monitorar a temperatura do dossel das culturas e determinar o momento de irrigar com base nas respostas das plantas (Jones, 2018; Peters e Evett, 2007).

Historicamente, essas aplicações empregavam o uso de termômetros por infravermelho industriais estacionários conectados a registradores de dados. Esses sensores podem ser caros, complicados e impraticáveis para aplicações comerciais na agricultura (O'Shaughnessy et al. 2011). Por sua vez, os termômetros por infravermelho sem fio são uma alternativa mais prática em aplicações agrícolas, contudo sua disponibilidade é limitada. Os sensores por infravermelho econômicos com saídas analógicas e digitais estão prontamente disponíveis no mercado e têm sido usados na indústria automobilística e médica, mas existem poucos estudos sobre esses sensores em ambientes agrícolas (Mahan & Yeater, 2008; Mahan et al. 2005).

Medições de temperatura foliar com termopares também foram descritas por Yang et al. (1989) para a cultura do pepino e por Katsoulas et al. (2001) para a roseira. Nos primeiros estudos realizados com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da temperatura foliar, como indicador do grau de estresse hídrico a que as plantas estavam submetidas, foi utilizada apenas a diferença entre a temperatura da cultura (t_c) e a do ar do ambiente de cultivo (t_a). Normalmente, essas medições eram conduzidas entre 12 e 13 horas quando a radiação solar incidente alcançava o seu

valor máximo. Nestes casos, assumia-se que as plantas estavam transpirando em condições plenas, ou seja, sem estresse, mas também as variáveis meteorológicas afetavam a diferença de temperatura “ $t_c - t_a$ ”.

A cana-de-açúcar é uma cultura que tem grande resistência ao estresse hídrico e suporta temperaturas elevadas, porém quando o ambiente apresenta restrições fisiológicas para as plantas e fornece as condições necessárias para o estresse hídrico, o fechamento estomático acontece de forma automática, reduzindo a perda de água e também a taxa fotossintética (Larcher, 2000; Taiz; Zeiger, 2004; Inman-Bamber, 2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área experimental

A área experimental (Figura 1) está localizada no município de Piracicaba, SP, na Fazenda Areão (latitude 22°42'03" S, longitude 47°38'37" W e altitude de 540 m), pertencente ao Departamento de Engenharia de Biosistemas, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP). O clima local é do tipo Aw segundo a classificação de Köppen (Dias et al., 2017), caracterizando-se como tropical com estação seca, com chuvas no verão e estiagem no inverno totalizando uma precipitação anual de 1.328 mm (Angelocci et al., 2002). A temperatura média nos meses mais frios é de 17 °C e nos meses mais quentes é 24,8 °C. O solo da área experimental é classificado como Nitossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006).

Figura 1. Área experimental na Fazenda Areão – Piracicaba-SP.

O trabalho foi desenvolvido com cana-de-açúcar da cultivar RB867515 em razão de sua grande relevância para o setor sucroenergético brasileiro. Atualmente essa cultivar é a mais plantada no Brasil, ocupando aproximadamente 25% do total da área cultivada com cana-de-açúcar (Censo Varietal Ridesa, 2019).

O preparo da área experimental para o plantio da cana-de-açúcar foi iniciado com a remoção de plantas de pinhão manso que estavam sendo cultivadas em uma área de 1,0 ha com irrigação por pivô central (Figura 2). As plantas de pinhão manso

cultivadas no campo foram retiradas por uma retroescavadeira (Figura 2A e 2B) e as plantas cultivadas nos seis lisímetros de pesagem presentes na área, foram removidas com a utilização ferramentas manuais, para evitar danos às células de carga ou até mesmo à estrutura dos lisímetros (Figura 2C).

Figura 2. Remoção de Pinhão manso da área experimental utilizando retroescavadeira (A), plantas de pinhão manso removidas (B), retirada de pinhão manso cultivado nos lisímetros de pesagem (C) e área experimental limpa (D).

3.2. Análise físico-hídrica e química do solo

Após a remoção de todas as plantas de pinhão manso e limpeza de todos os restos culturais presentes no solo da área experimental (Figura 2D), amostras deformadas e indeformadas foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm para a realização de análises químicas e físicas.

No Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biossistemas ESALQ/USP, foi determinada a densidade de partículas, a densidade do solo e por fim realizada a análise granulométrica segundo a metodologia de Bouyoucos (Tabela 1).

Tabela 1. Composição mineralógica e classe textural, densidade do solo e densidade de partículas do solo de cada camada de solo amostrada da área do experimento.

Camada (cm)	Ds g cm ⁻³	Dp	Argila -----g kg ⁻¹ -----	Silte	Areia	Classe Textural
0-20	1,47	2,65	530	222	247	Argilosa
20-40	1,50	2,65	650	174	176	Muito Argilosa
40-60	1,45	2,65	655	179	166	Muito Argilosa

Para obter as curvas de retenção de água no solo, foram retiradas 3 amostras indeformadas em cada camada de solo de interesse, utilizando-se do Coletor de Uhland. As curvas de retenção foram determinadas utilizando-se mesa de tensão e uma câmera de pressão de Richards. Os pontos de tensão escolhidos foram de 0,1; 1,0; 2,0; 4,0; 10; 30; 50; 100; 500; 1500 kPa. O ajuste das curvas foi realizado pelo modelo de van Genutchen (1980) (Equação 1).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\Psi_m|)^n]^m} \quad (1)$$

Em que:

θ - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, cm³ cm⁻³;

θ_r - umidade volumétrica residual do solo, cm³ cm⁻³;

θ_s - umidade volumétrica do solo saturado, cm³ cm⁻³;

α - parâmetro empírico, kPa⁻¹;

m , e n - parâmetros empíricos da equação, adimensionais;

Ψ_m - potencial mátrico, kPa

Os parâmetros empíricos da equação de van Genutchen (Tabela 2) foram obtidos com utilização da ferramenta Solver, do software Excel, a partir da minimização da soma dos quadrados dos desvios na estimativa da umidade do solo.

Tabela 2. Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten, densidade do solo e capacidade de água disponível (CAD) em cada camada de solo amostrada.

Profundidade	θ_s	θ_r	α	m	n	Ds	CAD
(cm)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				(g cm^{-3})	(mm)
0 - 20	0,559	0,121	0,9424	0,293	1,32	1.47	27,26
20 - 40	0,541	0,0966	0,709	0.241	1.48	1.5	33,30
40 - 60	0,524	0,0911	0,535	0,254	1,37	1.45	35,57

A análise química do solo foi realizada no Laboratório PiraSolos em Piracicaba-SP, para as camadas de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm de profundidade (Tabela 3). De posse do resultado da análise química, optou-se por não realizar calagem antes do plantio, uma vez que os valores de porcentagem de saturação de bases (V%) foram considerados altos. Foi realizada uma adubação com super fosfato simples em operação mecanizada no momento da formação dos sulcos para plantio, adicionando-se 12g de adubo por metro linear.

Tabela 3. Análise química do solo da área do experimento em cada camada de solo amostrada.

Camada	pH	M.O.	P	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	H+Al	Al^{3+}	SB	CTC	V
cm	CaCl_2	g dm^{-3}	mg dm^{-3}				mmol cdm^{-3}				%
0-20	6,0	18	10	2,5	55	18	20	0	51,7	72,7	71
20-40	5,8	9	2	1,2	47	21	20	0	38,6	55,6	69
40-60	5,5	2,3	2,4	2	45	19	18	0	31,2	45,1	60,5

3.3. Preparo da área e plantio

Antes do plantio foi realizada escavação para reinstalar os cabos de energia elétrica dos lisímetros de pesagem pertencentes à área (Figura 3A), escarificação do solo (Figura 3B) em uma profundidade de 50 cm e duas gradagens para destorroamento e preparo do solo para a formação de sulcos de plantio.

Figura 3. Escavação para instalar cabo dos lisímetros de pesagem (A), solo da área experimental após escarificação (B), formação de sulcos e adubação (C) e plantio de cana de açúcar (D).

As gradagens foram realizadas com intervalo de duas semanas. Entre uma gradagem e outra (Figura 3C), foi realizada uma aplicação de herbicida glifosato e 2,4-D na dosagem de 5 L ha^{-1} , por um pulverizador com barra central montado em um trator, para controle de plantas daninhas e da germinação de plântulas de pinhão manso, as quais persistiam germinando.

Após todas as operações com trator, as gemas de plantio foram distribuídas nos sulcos entre os dias 20 e 25 de outubro de 2018. O plantio foi realizado em linhas simples formadas em sentido circular, com espaçamento de 1,40 m entre linhas, 12 a 15 gemas distribuídas por metro linear em uma profundidade de 0,25 m e em uma área de 1,0 ha irrigada por pivô central (Figura 3D). Após a distribuição de gemas, a cobertura das mesmas foi realizada no dia 26 de outubro de 2018.

A coleta de dados foi iniciada a partir do mês de dezembro de 2018, quando foi verificado que a brotação das gemas estava relativamente uniforme na área cultivada (Figura 4A). Apesar de uma boa germinação, foi observado a ocorrência de pequenas falhas de brotação de gemas em alguns pontos da área, que só foram corrigidos tardiamente, após o perfilhamento e crescimento da área foliar da cana (Figura 4C). Quando a cana atingiu o crescimento máximo, não foram mais observadas falhas no do canavial, pois as folhas cobriam todo o solo; no entanto, a perda de colmos não pode ser suprida por esse crescimento.

Nos meses iniciais, até que o canavial cobrisse todo o solo, área experimental foi frequentemente capinada para remoção de plantas daninhas que podem ser observadas na Figura 4B, como também para a remoção de plantas de pinhão manso que persistiam germinando na área.

Figura 4. Área experimental com cana de açúcar em estágio de brotação e estabelecimento (A), perfilhamento e crescimento (B e C) e máximo desenvolvimento (D).

3.4. Manejo da irrigação

O canavial foi irrigado sempre que o solo apresentou 50% da capacidade de água disponível (CAD), com o objetivo de retornar o conteúdo de água do solo até a capacidade de campo. Portanto, foi adotado um turno de rega variável, em função da redução do conteúdo de água do solo provocado pela evapotranspiração da cultura (ET_c). A evapotranspiração da cultura foi calculada pelo produto da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente de cultivo (K_c), como preconizado pela FAO (Allen et al., 1998) (equação 1).

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (1)$$

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada diariamente pela equação de Penman-Montheith parametrizada pela FAO (Allen et al., 1998) (Equação

2). O coeficiente de cultivo utilizado no cálculo da evapotranspiração da cultura foi obtido do trabalho de Nassif (2013), o qual determinou a evapotranspiração de um canavial cultivado na Fazenda Areão, na mesma área onde este experimento foi realizado, utilizando o método do balanço de energia razão de Bowen. As variáveis de entrada, bem como as constantes da equação de cálculo da ETo foram obtidas com base nos valores dos elementos meteorológicos obtidos na estação meteorológica da Fazenda Areão (Figura 5).

$$ET_o = \frac{0,408 \times s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{hr} + 273} u_2 \times \Delta e}{s + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2)$$

Em que:

ETo - evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

R_n - radiação líquida na superfície da grama (MJ m⁻² d⁻¹);

G - fluxo de calor do solo (MJ m⁻² d⁻¹);

T_{hr} - temperatura média do ar (°C);

s - declividade da curva de pressão de saturação a T_{hr} (kPa °C⁻¹);

Y - constante psicrométrica, 0,063 (kPa °C⁻¹);

u₂ - média horária da velocidade do vento (m s⁻¹);

Δe – déficit de saturação de vapor do ar (kPa).

A estação meteorológica (Figura 5) possui um sistema de aquisição de dados automático (Datalogger da marca Campbell Scientific[®], do modelo CR1000), para aquisição e armazenamento de dados de radiação solar (Piranômetro modelo CMP3, Kipp & Zonen), temperatura e umidade relativa do ar (Termohigrômetro HMP45C, Vaisala), velocidade do vento (Anemômetro sônico, Windsonic 4, Gill), saldo de radiação (Saldo radiômetro, NR-Lite Kipp & Zonen) e pluviômetro para o cálculo da chuva (TE525mm, Texas Eletronics).

O datalogger foi programado realizar leituras a cada 5 segundos e armazenar médias a cada 15 min. Para assegurar confiabilidade nos dados, a estação meteorológica passou por manutenções quizenais, procedendo-se com a limpeza e verificação do funcionamento dos sensores.

Figura 5. Estação meteorológica da Fazenda Areão sobre superfície gramada.

Três baterias compostas de três tensiômetros instalados nas profundidades de 20 cm, 40 cm e 60 cm no terço superior, no terço médio e no terço inferior do canal de irrigação foram utilizados para o monitoramento da umidade do solo nos períodos de coleta de dados de temperatura com a finalidade de assegurar que o solo se encontrava próximo à capacidade de campo, para que a coleta de dados de temperatura não fosse afetada por fatores como o estresse hídrico da cultura.

A leitura dos tensiômetros foi realizada com um tensímetro digital da marca Blumat, que possui resolução de 0,1KPa.

O pivô central foi acionado de forma manual ajustando-se o percentímetro para a aplicação da lâmina necessária considerando-se uma eficiência de irrigação igual a 85%.

3.5. Medição da temperatura foliar

Para medir a temperatura do dossel foram utilizados sensores da temperatura por infravermelho da marca Melixis®, modelo MLX90614, com ângulos de visada de 35° e 15°. Estes sensores possuem calibração de fábrica para uma faixa de medição entre -70 a 380°C, resolução de 0,01°C e apresentam acurácia de 0,5°C. A detecção da temperatura no sensor se dá de maneira passiva, ou seja, pela detecção da

radiação infravermelha emitida por um objeto que chega até um conjunto de termopilhas.

Para a aquisição de dados desses sensores foi montado um sistema de medição em plataforma Arduino (Open Source) contendo duas placas com funções diferentes. Uma placa foi destinada para leitura e transmissão de dados para a outra placa que tinha a função de armazenar os dados recebidos em um cartão de memória.

A placa de leitura foi constituída de um Arduino UNO, que coleta dados do sensor por meio do protocolo de comunicação I2C, que é de simples conexão e programação, além de possibilitar a conexão de centenas de sensores endereçados digitalmente na mesma porta digital do arduino. Os dados coletados pela placa de leitura foram transmitidos por meio de comunicação serial para a placa com um Arduino ProMini que tinha a função de armazenar os dados em um cartão de memória. O Sistema foi programado para que esse processo de leitura e armazenamento de dados de temperatura fosse realizado a cada 2 segundos.

A placa dedicada para o armazenamento de dados foi montada com um Arduino ProMini, um modulo de relógio RTC do modelo DS3231, um módulo de cartão de memória (micro SD), um módulo de Bluetooth do modelo HC-05 para acessar o sistema e coletar os dados sem necessidade de abrir a caixa para acesso direto ao cartão de memória, além de um circuito analógico com regulador de tensão 7805 para alimentar o sistema com tensão de 5v (Figura 6A e 6B).

Figura 6. Diagrama eletrônico do datalogger em plataforma Arduino (A); detalhes do datalogger montado em plataforma Arduino (B).

Os sensores juntamente com as caixas dedicadas para leitura e armazenamento de dados, foram instalados em 6 posições distribuídas ao longo da linha lateral do pivô. O primeiro ponto de instalação foi a uma distância de 30 m em relação ao centro do pivô e os demais com espaçamento de 20 m entre si, até alcançar o último vão do pivô. Junto ao último sensor de temperatura, fixado na extremidade do pivô, foi instalado um GPS com precisão submétrica da marca TechGeo e modelo GTR-ABT, para coletar as coordenadas geográficas dos valores de temperatura. O pivô utilizado no experimento é de tamanho menor em relação aos pivôs que normalmente são encontrados instalados no Brasil.

Como todos os sensores foram instalados em locais fixos na linha lateral do pivô, as coordenadas geográficas de cada um deles foi determinada pela subtração do diâmetro da circunferência obtida pelo GPS na linha do sensor 6 (Figura 7) pela distância que cada sensor se encontrava dela (Figura 7).

Figura 7. Trajetória de leitura de temperatura dos sensores de infravermelho instalados no pivô central.

Em cada ponto de leitura de temperatura foram instalados quatro sensores, sendo dois direcionados para o dossel (linha de plantio) e outros dois direcionados para o solo (entrelinha). A fim de avaliar qual sensor apresenta melhores resultados na obtenção da temperatura do dossel foram usados sensores com ângulos de visada diferentes, tanto direcionados para o dossel como para o solo. Dos dois sensores direcionados para o dossel, um tinha ângulo de visada de 15° e outro de 35° . O mesmo foi feito para medir a temperatura do solo.

Cada sensor de temperatura foi instalado por dentro de um tubo de aço inoxidável e uma resina selante de poliuretano foi colocada na extremidade oposta ao sensor para impedir a entrada de água da chuva ou da irrigação. Os sensores foram fixados em um suporte de aço inoxidável articulado, para facilitar o seu ajuste e direcionamento no campo (Figura 8A e 8B).

Figura 8. Suporte do sensor de temperatura por infravermelho (A), sensor de temperatura por infravermelho por dentro do tubo de aço inoxidável (B).

Os suportes (Figura 8A) foram fixados na extremidade inferior de uma haste de metal com sentido vertical para baixo e com altura ajustável presa no tirante do pivô. Com esta haste foi possível regular a altura do sensor de acordo com o crescimento da cultura (Figura 9A), impedindo que os mesmos fossem englobados pelo dossel da cultura. Na extremidade de baixo da haste foi colocada uma barra horizontal para permitir a fixação dos sensores de dossel e de solo na distância de 70 cm entre si, como também para melhorar a fixação das caixas contendo os sistemas de aquisição de dados (Figura 9C).

A posição do sensor em relação ao dossel foi mantida sempre com uma distância de 0,5 m e com uma inclinação de 45° em relação ao solo (Figura 9D) a fim de minimizar possíveis erros de leitura pela exposição do solo no período inicial de desenvolvimento do canavial. Para alimentar o sistema com energia elétrica foi instalado no meio do pivô um abrigo com uma bateria estacionária de 12 v, um painel solar de 20 W de potência, e um disjuntor para ligar e desligar o sistema (Figura 9B). Para distribuir a energia foram instalados cabos de 2,0 mm fixados ao longo da linha lateral do pivô e conectados em cada caixa.

Quando levadas ao campo, as placas eletrônicas foram montadas dentro de caixas de plástico com tampas fechadas com parafuso e lacradas com plástico filme de PVC para proteção contra água da chuva e da irrigação (Figura 9C).

Figura 9. Instalação de hastes de sustentação e cabeamento para o sistema de medição (A), caixa contendo bateria estacionária e painel solar para alimentação do sistema (B), dataloggers e sensores de infravermelho instalados no pivô (C) e detalhe de um sensor instalado (D).

3.5.1. Medição fixa de temperatura

Foi montada uma estação fixa de monitoramento da temperatura localizada no interior do canavial (Figura 10). Nessa estação foram instalados sensores de temperatura por infravermelho com ângulos de visada de 15 e 35°, direcionados para o dossel (linha) e para o solo (entrelinha). A leitura destes sensores foi realizada por um sistema de aquisição e armazenamento idêntico ao instalado no pivô.

Foram instalados doze termopares de cobre-constantan fixados na parte abaxial de folhas aleatórias das plantas localizadas dentro da área de leitura dos sensores que foram direcionados para o dossel. Esses termopares foram instalados em dupla, ou seja, cada folha recebeu dois termopares e foi utilizada na análise dos dados a temperatura média. Para a fixação dos termopares nas folhas, foi utilizada uma fita microporosa (Micropore®) da marca 3M.

Também foi instalado um termohigrômetro para obtenção da temperatura e umidade relativa do ar no canavial. Um datalogger CR1000 (Campbell Scientific®)

conectado a um multiplexador AM 16/32 (Campbell Scientific®) foi utilizado para leitura e armazenamento dos dados dos termopares e do termohigrômetro. Para finalizar, também foi instalada uma bateria selada de 12 V e um painel solar de 10W para alimentação elétrica da estação.

Figura 10. Estação de medição fixa da temperatura do dossel e do solo utilizando sensores de infravermelho e termopares para coleta de temperatura da folha da cana de açúcar.

A medição da temperatura nessa estação foi realizada sempre a partir da véspera da coleta de dados com os sensores do pivô e finalizada um dia após esta coleta, totalizando um período de medição de mais aproximadamente 48h. O período de interesse de coleta de dados nesta estação foi nas 24h do dia de coleta de dados com o pivô. O datalogger foi programado para realizar leituras do termohigrômetro e dos termopares a cada 10 segundos e gerar medias a cada 15 min. A mesma programação foi realizada para a coleta de temperatura por sensores de infravermelho no sistema montado em plataforma Arduino.

3.5.2. Calibração dos sensores de temperatura

Apesar dos sensores de temperatura possuírem calibração de fábrica, foi realizada uma verificação do funcionamento de cada um dos que foram utilizados no experimento. Esta verificação foi realizada antes de levar os sensores ao campo.

Para tanto, utilizou-se um corpo negro calibrador de precisão de infravermelho com display para mostrar a temperatura. O calibrador foi previamente

aquecido por um soprador térmico e os sensores foram direcionados para o centro do corpo negro (Figura 11), realizando-se assim uma relação entre temperatura do calibrador e do sensor por infravermelho enquanto a temperatura reduzia gradativamente. Este procedimento foi repetido para cada um dos sensores utilizados no experimento.

Figura 11. Sensor de infravermelho direcionado para o calibrador de corpo negro.

Foi determinada a equação linear da relação entre a temperatura do objeto e a temperatura lida pelo sensor de infravermelho. Foi determinado o coeficiente de determinação (R^2), da raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE).

3.5.3. Rotina de coleta de dados

Os dados de temperatura foram coletados uma vez por mês, ao amanhecer e ao meio dia em dias de céu aberto e sem chuva. Um dia antes da coleta de dados a estação fixa de medição de temperatura foi ligada e o funcionamento de todos os sensores eram checados, incluindo os termopares, que eram verificados mais de uma vez ao dia. Na véspera da medição de temperatura também foi determinado o índice de área foliar (IAF) do canavial em todas as linhas de plantio onde estavam instalados os sensores de infravermelho no pivô. Para determinar o IAF foi utilizado o equipamento LAI-2200 da marca Licor[®].

4. RESULTADOS

4.1. Evapotranspiração da cultura

Os valores da evapotranspiração de referência (ET_o) e da evapotranspiração da cultura (ET_c) calculadas diariamente durante todo o experimento estão apresentados na Figura 12. No início do experimento, quando o canavial estava em fase de brotação das gemas e estabelecimento das plantas, o valor de K_c utilizado conforme a literatura (Nassif, 2013), foi de 0,3 e por este motivo a ET_c apresentou valores muito abaixo da ET_o, que foi calculada tendo como referência a superfície gramada da estação meteorológica.

Figura 12. Variação da evapotranspiração de referência (ET_o) e da evapotranspiração da cultura (ET_c) ao longo do experimento.

Na fase de perfilhamento o K_c utilizado foi de 0,66, como resultado da maior necessidade de água da cultura neste período. Após a consolidação dos perfilhos, a fase de crescimento iniciou-se com k_c de 0,8, passando por 1,12, e no máximo crescimento de área foliar da cultura o k_c foi de 1,3. O consumo hídrico total da cultura, ao longo do período experimental foi de 715,3 mm, enquanto a evapotranspiração de referência apresentou um total de 776,1mm, para cerca de seis meses. Em trabalho realizado por Cabral et al. (2012), a evapotranspiração total foi de 829 mm para todo o ciclo da cultura, contudo outros autores já obtiveram valores bem maiores de

evapotranspiração, como foi o caso de Oliveira et al. (2015), os quais encontraram evapotranspiração de 1.916,36 mm no ciclo da cana-de-açúcar no semiárido baiano.

4.2. Irrigação

Na Figura 13 está apresentada a distribuição de chuvas, os eventos de irrigação e a variação do armazenamento de água no solo ao longo do experimento. O experimento foi iniciado na época chuvosa da região de Piracicaba, portanto grande parte da água utilizada pela cultura foi oriunda das chuvas. A precipitação total no período experimental foi de 673 mm, enquanto a lâmina total de irrigação foi de 316 mm.

Figura 13. Distribuição de chuvas, irrigação e armazenamento de água no solo ao longo do período experimental.

4.3. Calibração dos sensores de infravermelho

A verificação de funcionamento dos sensores de infravermelho MLX90614 apresentou bons resultados. A relação entre a temperatura do calibrador de corpo negro e a leitura obtida pelos sensores de infravermelho apresentou forte correlação linear, e valores de RMSE menores que os valores de acurácia indicados pelo fabricante, que é de 0,5°C, como também foi verificado por O'Shaughnessy et al. (2011).

O maior valor da raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios (RMSE) encontrada, tanto para os sensores de 15° como para os sensores de 35° de ângulo de visada, foi de 0,27°C. Da mesma forma, o maior valor encontrado para o erro médio absoluto (MAE) foi de 0,22°C, para ambos os sensores. Já os valores mínimos encontrados para o RMSE e MAE, foram de 0,24 e 0,20°C respectivamente, levando em consideração todos os sensores analisados.

Na Tabela 4 estão apresentadas todas as equações lineares, os coeficientes de determinação e os parâmetros estatísticos de avaliação da performance RMSE e MAE dos sensores de temperatura do modelo MLX90614 com ângulo de visada de 15 e 35°C.

Tabela 4. Equação de calibração dos sensores de temperatura por infravermelho (modelo MLX90614) em função da temperatura do corpo negro e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), raiz quadrada da media dos quadrados dos desvios (RMSE) e Erro médio absoluto (MAE)

Ângulo de visada	Número do Sensor	Equação	R^2	RMSE (°C)	MAE (°C)
15°	1	$y = 0.9946x$	0.9998	0.24	0.20
	2	$y = 0.998x$	0.9991	0.26	0.20
	3	$y = 0.9983x$	0.999	0.27	0.22
	4	$y = 0.9979x$	0.9991	0.27	0.21
	5	$y = 0.9983x$	0.999	0.27	0.22
	6	$y = 0.9982x$	0.9991	0.26	0.20
	7	$y = 0.9981x$	0.9991	0.27	0.21
	8	$y = 0.9982x$	0.999	0.27	0.22
	9	$y = 0.9977x$	0.9991	0.26	0.21
	10	$y = 0.9978x$	0.999	0.27	0.22
	11	$y = 0.9961x$	0.9993	0.27	0.21
35°	1	$y = 0.9977x$	0.9991	0.27	0.21
	2	$y = 0.9979x$	0.9991	0.26	0.21
	3	$y = 0.9975x$	0.9992	0.26	0.21
	4	$y = 0.9979x$	0.999	0.26	0.21
	5	$y = 0.9979x$	0.9991	0.26	0.21
	6	$y = 0.9978x$	0.9992	0.26	0.20
	7	$y = 0.9987x$	0.999	0.26	0.21
	8	$y = 0.9985x$	0.999	0.27	0.21
	9	$y = 0.9979x$	0.9991	0.27	0.22
	10	$y = 0.9981x$	0.9991	0.26	0.20
	11	$y = 1.0002x$	0.9989	0.26	0.21

4.4. Índice de área foliar

Na Tabela 5 estão apresentados os valores do índice de área foliar do canavial nas seis linhas de medição da temperatura do dossel pelos sensores de infravermelho instalados no pivô central. A linha com menor crescimento de área foliar foi a linha 1, localizada mais próxima ao centro do pivô, a qual alcançou no seu máximo crescimento um valor de IAF igual a 2,9. As plantas nas demais áreas do canavial apresentaram bom crescimento, principalmente as plantas no terço final da área experimental no pivô central, nas linhas 5 e 6 que apresentaram IAF de 3,92 e 4,32 respectivamente.

O menor índice de área foliar da cana-de-açúcar, que foi observado na linha 1, ocorreu por consequência do menor perfilhamento das plantas nesta área, deixando alguns espaços abertos na copa e, portanto, expôs com maior facilidade as entrelinhas nessa área até o mês de março, quando as plantas apresentaram crescimento suficiente para cobrir o solo, tanto quanto nas outras áreas do canavial.

Tabela 5. Índice de área foliar do canavial nas seis linhas de medição de temperatura.

DAP	Data	Índice de Área Foliar (IAF)					
		1	2	3	4	5	6
46	12/dez	0,22	0,41	0,57	0,46	0,66	0,84
81	15/jan	0,95	1,35	1,53	1,43	1,78	2,15
112	18/fev	1,7	1,8	2,11	2,22	2,09	2,51
142	18/mar	2,3	2,51	2,8	2,64	2,8	2,94
174	17/abr	2,7	3,45	3,51	3,54	3,65	3,81
207	20/mai	2,9	3,85	3,78	3,88	3,92	4,32

4.5. Calibração de campo

A calibração de campo consistiu na comparação entre as medidas de temperatura obtidas pelos termopares com a temperatura obtida pelos sensores de infravermelho direcionados para o dossel e também para o solo. Denominou-se calibração, porém foi realizada uma verificação de campo. Desta maneira foi possível observar o quanto os valores de temperatura medidos pelos sensores de infravermelho se aproximavam dos valores de temperatura medidos pelos

termopares. Para esta finalidade, valores de temperatura obtidos pelos termopares foram considerados os valores verdadeiros, uma vez que os termopares estavam em contato direto com as folhas.

Na Figura 14 estão apresentadas as variações diárias da temperatura medida pelos termopares em cada dia de coleta de dados no experimento. É possível observar uma grande oscilação nos valores de temperatura registrada pelos termopares. No dia 12 de dezembro (Figura 14A), a temperatura variou de um valor mínimo de 9,47 °C até um valor máximo de 35,9°C. No dia 15 de janeiro (Figura 14B) a variação foi de 18,34 °C até 36,92°C. No dia 18 (Figura 14C) de fevereiro a temperatura variou entre 14,85 e 30,25 °C. Em 18 de março (Figura 14D) esta variação foi de 11,67 a 30,08 °C. A variação da temperatura foi de 16,76 a 27,33 °C no dia 17 do mês de abril (Figura 14E) e de 9,98 a 25,62 °C no dia 20 do mês de maio (Figura 14F).

Teoricamente, a temperatura foliar varia próxima a valores correspondentes à temperatura do ar, e esta variação ocorre principalmente em função da abertura estomática. Os estômatos quando abertos possibilitam a transpiração foliar, que provoca a diminuição da temperatura foliar, uma vez que o vapor d'água conduzido da folha para a atmosfera transporta o calor acumulado no limbo foliar. Em contrapartida, quando os estômatos se fecham, seja por fatores internos ou externos à planta no continuum solo-planta-atmosfera, a temperatura foliar tende a aumentar em valores acima da temperatura do ar, uma vez que a transpiração, quando interrompida, não mais dissipa o calor acumulado nas folhas.

Estas oscilações de temperatura foliar ao longo do dia ocorrem naturalmente, mesmo em plantas devidamente supridas por água no solo, pois os estômatos estão constantemente fechando e abrindo em função da redistribuição de água no interior dos tecidos vegetais (mecanismos fisiológicos internos da planta), como também em resposta à variação nos elementos meteorológicos como o déficit de pressão de vapor e a radiação solar. Os estômatos são constituídos por células-guarda que funcionam de forma dinâmica como válvulas hidráulicas sensoriais respondendo a fatores ambientais, como intensidade e qualidade da luz, temperatura, condição hídrica foliar e concentração intracelular de CO₂, e, por isso regulam a abertura e o fechamento estomático (Angellocci, 2002).

Embora estas variações na temperatura foliar sejam esperadas, alguns valores obtidos destoam muito em relação aos valores da temperatura do ar. Em alguns casos foram encontradas diferenças entre a temperatura foliar e a temperatura

do ar da ordem de 10 °C. Estas diferenças muito grandes podem ser provocadas pela dificuldade em se manter o contato dos termopares com as folhas, já que em alguns momentos, como ao amanhecer, a presença de orvalho pode facilitar que o termopar desgrude da folha. Estas diferenças também podem se dar por outros erros inerentes ao próprio método de medição, embora os termopares tenham sido matidos cuidadosamente fixados nas folhas e esta seja uma metodologia vastamente utilizada em pesquisas para a medição da temperatura foliar de culturas e na identificação do estresse hídrico.

Apesar da grande variação de temperatura observada nos termopares, o curso diário apresentou tendência semelhante à variação da temperatura do ar, e, nos dias mais frios, observou-se que a variação de temperatura foi menor.

Figura 14. Variação diária da temperatura da folha da cana de açúcar medida por termopares nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).

Ainda que tenham ocorrido grandes oscilações de temperatura foliar medida pelos termopares, os valores médios apresentaram boa relação com a temperatura do ar (Figura 15). Observa-se na Figura 15 o curso da temperatura foliar média medida pelos termopares e o quanto esses valores acompanham a temperatura do ar,

demonstrando que, em geral, a distribuição dos termopares na planta foi feita de forma aceitável. Na Figura 15 também se observa o curso da temperatura do dossel e do solo, medidas pelos sensores de infravermelho.

Os sensores de infravermelho medem a temperatura de forma passiva e indireta. De forma passiva porque recebe a radiação infravermelha emitida pelos objetos dentro da sua área de abrangência e indireta, pois converte digitalmente todo o fluxo de radiação no comprimento de onda do infravermelho que foi recebido em valores de temperatura. Esta conversão é feita com base na lei de Stefan-Boltzmann, a qual descreve que o fluxo de radiação termal emitida por um objeto é proporcional à quarta potência da temperatura do objeto.

Portanto, mesmo que os sensores de infravermelho tenham sido direcionados para o dossel com o objetivo de medir apenas a temperatura das folhas, o pequeno crescimento em área foliar no início do cultivo permitiu que os sensores instalados no campo e no pivô medissem a temperatura de todos os objetos que estavam em seu raio de alcance, tanto nas folhas como o solo. Por essa causa, no início do cultivo da cana-de-açúcar a medição da temperatura pelos sensores de infravermelho foi superestimada, já que os sensores receberam radiação termal tanto das folhas, quanto do solo que apresentava temperaturas altas nesta época do ano. Estes detalhes podem ser observados na Figura 15, que apresenta o curso diário da temperatura em todos os dias de coleta.

De forma geral, observa-se na Figura 15 que os sensores de infravermelho com ângulo de visada de 15° apresentaram os maiores valores de temperatura medidos. Os sensores que possuem o ângulo de visada mais fechados (15°) podem ter vantagens em relação aos sensores com ângulos mais abertos (35°) em algumas situações específicas, como por exemplo, quando o alvo de interesse estiver imóvel, pois desta forma reduz o risco do sensor captar radiação infravermelha que foi emitida por outro objeto e refletida pelo alvo de interesse no qual o sensor esta direcionado. Neste estudo de caso, as folhas da cana encontram-se constantemente em movimento pela ação do vento, e, por isso o sensor pode em determinados momentos coletar dados de temperatura do solo, ou mesmo dados mesclados (solo e folha), já que a folha se move para fora do campo de visada do sensor.

Figura 15. Variação diária da temperatura média da folha da cana de açúcar medida por termopares, da temperatura do ar, e da temperatura do dossel e do solo obtidas pelos sensores de temperatura por infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).

Também é possível observar na Figura 15 que, à medida que o índice de área foliar aumenta, mês a mês, os valores de temperatura medidos pelos sensores de infravermelho se aproximam dos valores da temperatura do ar e da temperatura média

obtida dos termopares, o que pode ser explicado pela redução da área de solo exposto.

Na Figura 16 estão apresentadas as relações entre a temperatura média obtida pelos termopares e a temperatura medida pelos sensores de infravermelho direcionados para o dossel.

No primeiro mês de coleta de dados, quando as plantas se encontravam ainda em fase de estabelecimento, o índice de área foliar era muito pequeno; por isso, uma grande fração de solo estava exposto e recebia radiação solar de forma direta ao longo de todo o dia. A grande exposição do solo à radiação solar nesta fase do ciclo do canavial, provocou a elevação da temperatura do solo à valores muito altos, chegando muitas vezes acima dos 60 °C nos horários de pico. Como consequência, mesmo os sensores direcionados para o dossel, próximos às plantas, apresentaram valores muito altos de temperatura, pois de certa forma capturavam radiação termal oriunda do solo e de pequenos fragmentos de rochas presentes na superfície.

Os sensores com os dois ângulos de visada utilizados no experimento apresentaram superestimativa da temperatura do dossel. Essa superestimativa da temperatura foi reduzindo à medida em que o canavial se desenvolveu, passando pelas fases de perfilhamento e crescimento. Observou-se também na Figura 16, que o sensor com maior ângulo de visada (35°) apresentou uma superestimativa relativamente menor em relação ao sensor com menor ângulo de visada (15°), nos três primeiros meses do experimento, ainda assim, os valores foram considerados muito altos.

No primeiro mês (Figura 16A), o sensor com ângulo de visada de 35° apresentou valores 66,6% maiores, enquanto o sensor com ângulo de 15° apresentou valores 72,09% maiores em relação à medição com termopar. Os sensores com ângulo de visada de 35° apresentaram valores maiores na ordem de 54,59; 67,67 e 46,2% nos meses de janeiro, fevereiro e março respectivamente (Figura 16B, 16C e 16D). Já os sensores com ângulo de 15° apresentaram valores maiores na ordem de 66,4; 89,6 e 37,9% nos meses de janeiro, fevereiro e março respectivamente (Figura 16B, 16C e 16D).

Nos dois últimos meses do experimento, a superestimativa da temperatura foi próxima à zero, com valores observados de 2,4 e 1,8% para os sensores com 35 e 15° de ângulo de visada (Figura 16E), respectivamente, no dia 17 de abril. No mês de

maio esses valores foram de 4,0 e 1,68% para os sensores com 35 e 15° de ângulo de visada, respectivamente (Figura 16F).

Uma outra observação que pode ser feita com relação à Figura 16 é que as relações de temperatura apresentaram coeficientes de determinação (R^2) crescentes em função do crescimento da cana-de-açúcar, mês a mês. Nos primeiros três meses o R^2 apresentou valores abaixo de 0,5, indicando grande dispersão nos valores da relação linear, o que pode ter sido causado mais uma vez pelos baixos valores de IAF e pelas oscilações do limbo foliar por efeito do vento fazendo com que os sensores capturem radiação termal oriunda do solo.

Nos meses de março, abril e maio os valores de R^2 foram maiores que 0,5, sendo que no último mês o valor obtido foi de 0,89 para o sensor com ângulo de abertura de 35° e 0,82 para o sensor com ângulo de abertura de 15° (Figura 16F).

Figura 16. Correlação entre a temperatura média medida pelos sensores de infravermelho direcionados para o dossel e a temperatura média obtida dos termopares nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de maio de 2019 (F).

Na Figura 17 estão apresentadas as relações entre a temperatura média obtida pelos termopares e a temperatura medida pelos sensores de infravermelho direcionados para o solo.

Nessas relações (Figura 17) observou-se o mesmo comportamento em relação aos sensores direcionados para o dossel apresentados na Figura 16. No entanto, utilizou-se essas relações (Figura 17) para avaliar em quanto tempo o

crescimento do canavial em área foliar é suficiente para reduzir os erros de medição da temperatura do dossel com sensores direcionados para o solo (entrelinha).

Na medida em que as plantas aumentaram o índice de área foliar, não somente a linha de plantio, como também as entrelinhas se tornaram cada vez mais encobertas por folhas, e, o solo que antes era exposto diretamente à radiação solar passou a receber a proteção desta cobertura e reduziu desta forma a sua temperatura na superfície.

Neste caso, verificou-se um comportamento similar entre os sensores direcionados para o dossel e para o solo; contudo, os sensores direcionados para o solo (Figura 17) apresentaram maior superestimativa da temperatura foliar, como era esperado. De forma geral os sensores com ângulo de visada mais fechado (15°) apresentaram os maiores valores superestimados, chegando a alcançar valor de 118,9% de superestimativa no mês de fevereiro de 2019 (Figura 17C).

No primeiro mês (Figura 17A), o sensor com ângulo de visada de 35° apresentou uma superestimativa de 81,7%, enquanto o sensor com ângulo de 15° apresentou superestimativa de 93,7%, valores considerados muito altos e que impedem a utilização dos valores de temperatura para fins práticos, como na determinação do estresse hídrico da cultura, por exemplo. Os sensores com ângulo de visada de 35° apresentaram superestimativa de 69,1; 103,9 e 43,27% nos meses de janeiro, fevereiro e março respectivamente (Figura 17B, 17C e 17D). Já os sensores com ângulo de 15° apresentaram superestimativa de 83,24; 118,9 e 46,84% nos meses de janeiro, fevereiro e março respectivamente (Figura 17B, 17C e 17D).

Nos dois últimos meses do experimento, a superestimativa da temperatura foi próxima à zero, com valores observados de 1,8 e 5,1% para os sensores com 35 e 15° de ângulo de visada (Figura 17E), respectivamente, no dia 17 de abril. No mês de maio esses valores foram de 2,56 e 2,88% para os sensores com 35 e 15° de ângulo de visada, respectivamente (Figura 17F).

Figura 17. Correlação entre a temperatura média medida pelos sensores de infravermelho direcionados para o solo e a temperatura média obtida dos termopares nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de maio de 2019 (F).

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados do teste t para os dados pareados de temperatura média dos sensores de infravermelho com ângulos de visada de 15 e 35° direcionados para o dossel e para o solo e, da temperatura média obtida pelos termopares.

A temperatura medida pelos sensores de infravermelho direcionados para o dossel diferiu significativamente da temperatura medida pelos termopares nos quatro primeiros meses do experimento (12 de dezembro de 2018, 15 de janeiro, 18 de fevereiro e 18 de março de 2019) não apresentando diferença significativa nos meses

finais do experimento (17 de abril e 20 de maio de 2019). A diferença significativa nos primeiros meses pode ser explicada pelo menor índice de área foliar (IAF) apresentado pela cultura neste período, como já foi discutido nas Figuras 14, 15, 16 e 17. O mesmo comportamento foi observado em relação ao sensor de ângulo de visada de 15° direcionado para o dossel.

A temperatura medida pelos sensores de infravermelho direcionados para o solo diferiu significativamente da temperatura medida pelos termopares nos quatro primeiros meses do experimento (12 de dezembro de 2018, 15 de janeiro, 18 de fevereiro e 18 de março de 2019), comportamento semelhante aos sensores direcionados para o dossel. No entanto, o sensor com ângulo de visada de 15° apresentou diferença significativa também no dia 14 de abril, quando o índice de área foliar já era alto o suficiente para que o solo estivesse completamente coberto. Este resultado é um indicativo que nessas condições de cobertura da superfície pela parte aérea da cana-de-açúcar, o sensor com ângulo de visada de 15° pode ser apropriado para a medição da temperatura do solo. No dia 20 de maio de 2019, as temperaturas de ambos os sensores não diferiram significativamente da temperatura medida pelo termopar.

De modo geral, observa-se na Tabela 6 que, independente do sensor utilizado ou do direcionamento adotado, os valores de temperatura são iguais quando o canal se encontra em fase de crescimento, com o máximo de índice de área foliar.

Tabela 6. Probabilidade de significância ($Pr > t$) para o teste t das médias de temperatura do dossel e do solo

Sensores		Pr > t					
		12/12	15/01	18/02	18/03	17/04	20/5
Dossel 35°	Termopar	2.35E-50*	1.15E-31*	1.16E-30*	1.45E-22*	0.068 ^{ns}	0.0524 ^{ns}
	Solo 15°	2.23E-40*	9.31E-05*	0.0001***	0.0215***	0.0805 ^{ns}	0.3163 ^{ns}
	Solo 35°	8.18E-28*	0.0988 ^{ns}	0.0781 ^{ns}	0.1118 ^{ns}	0.3521 ^{ns}	0.2777 ^{ns}
	Dossel 15°	0.1173 ^{ns}	0.010526***	8.69E-05*	0.0291***	0.3783 ^{ns}	0.1645 ^{ns}
Dossel 15°	Termopar	8.83E-45*	2.15E-34*	4.35E-39*	4.15E-26*	0.0951 ^{ns}	0.3119 ^{ns}
	Solo 15°	5.32E-35*	0.0963 ^{ns}	0.4825 ^{ns}	0.4422 ^{ns}	0.0368*	0.3068 ^{ns}
	Solo 35°	4.92E-23*	0.169 ^{ns}	0.00984***	0.2554 ^{ns}	0.4615 ^{ns}	0.3418 ^{ns}
Solo 35°	Termopar	7.82E-64*	5.71E-31*	5.33E-33*	4.31E-24*	0.131 ^{ns}	0.166 ^{ns}
	Solo 15°	0.00054**	0.011483***	0.01189*	0.213 ^{ns}	0.0376***	0.4582 ^{ns}
Solo 15°	Termopar	2.21E-74*	3.74E-41*	1.1E-35*	6.63E-26*	0.0022***	0.1415 ^{ns}

* Diferem significativamente em $p < 0,0001$; ** Diferem significativamente em $p < 0,001$; *** Diferem significativamente em $p < 0,05$; ^{ns} Não diferem significativamente.

4.6. Temperatura do dossel medida por sensores instalados no pivô central

Na Figura 18 estão apresentados os dados médios da temperatura do dossel medidos ao amanhecer por seis sensores de infravermelho instalados no pivô central.

De forma geral, é possível observar na Figura 18 e na Tabela 7 que a temperatura média obtida pelos sensores com ângulo de visada de 15° apresentou valores maiores que a temperatura obtida pelos sensores com ângulo de visada de 35°, em todos os dias analisados.

Nos primeiros quatro meses de coleta de dados (Figuras 18A, 18B, 18C e 18D) observou-se que a temperatura do solo aumentou rapidamente na medida em que o pivô se deslocou pela área cultivada. Este rápido aumento da temperatura da superfície é causado pela ampla área de solo exposto neste período do cultivo da cana, associado as altas taxas de radiação solar que chegam diretamente ao solo nesta época do ano, que abrange o final da primavera (10 dias), todo o verão e início do outono (10 dias).

Com o crescimento da área foliar, mês a mês, notou-se que a temperatura do dossel medida, foi gradativamente reduzindo, aproximando-se da temperatura do ar. No mês de fevereiro (Figura 18C) observou-se que, após o perfilhamento e razoável crescimento em área foliar, a temperatura medida pelos sensores de infravermelho na parte central das linhas de cultivo apresentou valores médios menores do que em relação às bordas onde ainda havia solo exposto.

No mês de março (Figura 18D), a temperatura medida pelos sensores de infravermelho apresentou valores abaixo da temperatura do ar em quase toda a área, o que demonstra que a área foliar teve crescimento suficiente para minimizar os erros de medição.

Nos meses seguintes, abril e maio (Figura 18E e 18F), a temperatura média do dossel apresentou tendência de redução dos valores na medida em que a temperatura do ar aumenta gradativamente. Inicialmente, observa-se que a temperatura se encontra próxima à temperatura do ar e depois diminui gradativamente. Esta variação ao amanhecer, ocorre em consequência da dissipação de calor sensível nas folhas devido à evaporação do orvalho presente nas folhas e da transpiração das mesmas.

Na Figura 19 estão apresentados os dados médios da temperatura do solo medidos ao amanhecer por seis sensores de infravermelho instalados no pivô central. Da mesma forma como nos sensores direcionados para o dossel, os sensores direcionados para o solo também apresentaram o mesmo comportamento em relação a diferença de temperatura entre os dados obtidos com os de ângulo aberto (35°) e os de ângulo fechado (15°). Os sensores com ângulo de 35° apresentaram menores valores de temperatura que os sensores de 15°.

Grandes oscilações podem ser observadas no curso da temperatura, tanto nos sensores direcionados para o dossel quanto para o solo. Essas oscilações resultam das variações de alvos na superfície que possuem temperaturas diferentes.

Figura 18. Curso da temperatura do dossel medida ao amanhecer (de 6:30h às 7:20h) por sensores de infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).

Figura 19. Curso da temperatura do solo medida ao amanhecer (de 6:30h às 7:20h) por sensores de infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).

Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios da temperatura do dossel, da temperatura do solo, da diferença entre temperatura do dossel e temperatura do ar, da diferença entre temperatura do solo e a temperatura do ar e a temperatura do ar. Observa-se na Tabela 7 que a temperatura do solo sempre foi maior que a

temperatura do dossel, mesmo que a diferença seja pequena, como foi o caso dos meses de abril e maio, quando a diferença de temperatura entre o solo e o dossel foi menor que 0,3 °C.

Nos primeiros três meses do experimento, quando o índice de área foliar médio do canavial foi menor que 2,07, a diferença de temperatura entre o dossel e o ar, bem como a diferença de temperatura entre o solo e o ar apresentaram valores positivos, indicativo de estresse hídrico pelo bloqueio da transpiração; contudo, apenas um indicativo uma vez que o conteúdo de água no solo encontrava-se próximo à capacidade de campo. Nos meses de março, abril e maio quando o índice de área foliar médio ultrapassou 2,67, a diferença de temperatura entre o dossel e o ar, e a diferença de temperatura entre o solo e o ar apresentaram valores negativos, o que indica que as plantas estavam transpirando livremente.

Tabela 7. Temperatura média ao amanhecer medida por sensores de infravermelho instalados no pivô central, nas linhas de cultivo do canavial.

Data	IAF	Sensor	Temperatura média (°C)				
			Dossel	Solo	Dossel - ar	Solo - ar	Temp. ar
12/dez	0,53	35°	21,00	21,71	0,90	1,61	20,1
		15°	21,94	22,42	1,84	2,32	
15/jan	1,53	35°	24,80	25,73	1,78	2,71	23
		15°	25,71	26,44	2,69	3,42	
18/fev	2,07	35°	21,34	21,56	0,26	0,48	21,08
		15°	21,90	22,08	0,82	1,00	
18/mar	2,67	35°	19,75	20,19	-1,77	-1,32	21,52
		15°	20,62	21,09	-0,90	-0,42	
17/abr	3,44	35°	18,04	17,77	-1,18	-1,45	19,23
		15°	18,57	18,45	-0,65	-0,77	
20/mai	3,78	35°	13,37	13,42	-0,99	-0,94	14,36
		15°	13,87	14,05	-0,49	-0,31	

Na Figura 20 estão apresentados os dados médios da temperatura do dossel medidos ao meio dia por seis sensores de infravermelho instalados no pivô central.

Da mesma forma como foi verificado com os dados de temperatura obtidos ao amanhecer, nos dados obtidos ao meio dia a temperatura média dos sensores com ângulo de visada de 15° apresentou valores maiores que a temperatura obtida pelos sensores com ângulo de visada de 35°, em todos os dias analisados. O mesmo comportamento foi observado com os dados obtidos dos sensores direcionados para o solo (Figura 21).

Grande oscilação dos valores de temperatura foi observada nos primeiros meses do experimento, tanto nos sensores do dossel, quanto nos sensores do solo (Figuras 20 e 21). O objetivo final dos sensores instalados no pivô é medir a temperatura do dossel, mesmo os sensores direcionados para o solo; contudo, as grandes oscilações dos valores de temperatura indicam que a variabilidade de alvos na superfície é grande, ou seja, folhas e solo se alternando na medida em que o pivô se desloca na área.

Neste caso, um aspecto importante a se destacar é que as linhas de plantio foram formadas em formato circular, para que os sensores acompanhassem as linhas e entre linhas por inteiro, evitando que a medição de linha e entrelinha fosse realizada de forma alternada. Os termômetros infravermelhos portáteis são capazes de medir a temperatura do dossel em pequena escala com alta resolução espacial (Evans et al., 2000; Sadler et al., 2002; Bockhold et al., 2003; Sepulcre-Cantó et al., 2006).

Portanto, as grandes oscilações dos valores de temperatura que é visualizada nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março (Figuras 20A, 20B, 20C, 20D e 21A, 21B, 21C e 21D) é resultado da alternância entre solo e folha dentro da linha e entre linha de medição própria de cada sensor. Nesses meses iniciais, a diferença de temperatura entre o dossel e o ar, e a diferença de temperatura entre o solo e o ar apresentaram valores médios positivos muito elevados (Tabela 8), maiores que 10°C de forma geral, chegando a apresentar valores máximos de 20,61 e 24,10°C no mês de dezembro e valores mínimos de 1,95 e 7,64°C no mês de março, para a temperatura do dossel e temperatura do solo, respectivamente.

A temperatura da superfície no início do experimento apresenta valores muito altos, alcançando valores extremos próximos de 60°C. Contudo, é possível notar que a temperatura média vai reduzindo o seu valor, mês a mês, até próximo da temperatura do ar no mês de março, tanto nos sensores direcionados para o dossel quanto para o solo (Figura 20D e 21D).

Nos meses de abril e maio a temperatura do dossel (Figura 20E e 20F) e do solo (Figura 21E e 21F) quando medidas ao meio dia esteve abaixo da temperatura do ar, quando o índice de área foliar médio ultrapassou o valor médio de 2,67. A diferença de temperatura entre o dossel e o ar, e a diferença de temperatura entre o solo e o ar apresentaram valores negativos (Tabela 8), com valores médios maiores que $-1,5^{\circ}\text{C}$. Em ambos os casos é possível observar que a temperatura do dossel e do solo acompanham a variação da temperatura do ar.

Figura 20. Curso da temperatura do dossel medida ao meio dia (de 12h às 12:50h) por sensores de infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).

Figura 21. Curso da temperatura do solo medida ao meio dia (de 12h às 12:50h) por sensores de infravermelho nos dias 12 de dezembro de 2018 (A), 15 de janeiro de 2019 (B), 18 de fevereiro de 2019 (C), 18 de março de 2019 (D), 17 de abril de 2019 (E) e 20 de abril de 2019 (F).

Tabela 8. Temperatura média ao meio dia medida por sensores de infravermelho instalados no pivô central, nas linhas de cultivo do canavial.

Data	IAF	Sensor	Temperatura média (°C)				
			Dossel	Solo	Dossel - ar	Solo - ar	Temp. ar
12/dez	0,53	35°	46,08	49,20	17,21	20,33	28,87
		15°	49,48	52,97	20,61	24,10	
15/jan	1,53	35°	44,42	46,24	13,21	15,03	31,21
		15°	47,85	50,14	16,64	18,93	
18/fev	2,07	35°	37,57	45,80	11,71	19,94	25,86
		15°	41,52	49,13	15,66	23,27	
18/mar	2,67	35°	30,35	36,04	1,95	7,64	28,4
		15°	33,48	38,98	5,08	10,58	
17/abr	3,44	35°	22,09	22,23	-3,73	-3,58	25,81
		15°	23,00	23,31	-2,81	-2,51	
20/mai	3,78	35°	18,09	17,90	-2,54	-2,73	20,63
		15°	19,06	18,83	-1,57	-1,80	

Nas Figuras 22, 23, 24 e 25 estão apresentados os mapas com a distribuição espacial da temperatura do dossel e do solo no canavial, medidos por cada um dos sensores de infravermelho com ângulo de visada de 35° instalados no pivô central. Estes mapas foram gerados com os dados obtidos ao amanhecer e ao meio dia.

Da mesma forma como foi observado com os dados médios de temperatura medida pelos sensores direcionados para o solo e para o dossel, é possível observar que nos primeiros meses do experimento a temperatura medida ao amanhecer aumenta de valor na medida em que o pivô se desloca na área, enquanto que no mês de abril a distribuição da temperatura ocorre de forma mais uniforme. No último mês de coleta de dados (maio), a temperatura decresce na medida em que o pivô se desloca na área do canavial.

Em relação aos dados obtidos ao meio dia, observa-se que a distribuição da temperatura apresentou comportamento diferente. Nos primeiros meses a distribuição da temperatura apresentou oscilação enquanto que nos meses finais houve acréscimo nos valores, embora esse acréscimo ocorresse com a temperatura do dossel mantendo-se com valores abaixo da temperatura do ar.

O mesmo pode ser observado com relação aos dados de temperatura dos sensores de 15° de ângulo de visada. Nas Figuras 26, 27, 28 e 29 estão apresentados os mapas com a distribuição espacial da temperatura do dossel e do solo no canavial, medidos por cada um dos sensores de infravermelho com ângulo de visada de 15° instalados no pivô central.

Um aspecto importante é que, para fins práticos, a medição da temperatura do dossel para determinação do índice de estresse hídrico, ou outras finalidades, é realizada normalmente em um determinado horário do dia, ao amanhecer e ao meio dia. Contudo, este método de medição com os sensores fixados no pivô central, a obtenção da temperatura se dá de forma contínua por algum tempo, em função do tamanho área irrigada, o que causa este efeito de variação da temperatura por causa da mudança das características meteorológicas no ambiente, como observado por O'Shaughnessy et al. (2010), O'Shaughnessy et al. (2011), Bitella et al. (2014), Sui & Baggard (2018) e Peter & Evett (2004). No entanto, em cultivos homogêneos como é o caso da cana de açúcar, pode-se utilizar uma amostra dos dados de temperatura, para a determinação de indicadores de estresse hídrico da cultura.

Figura 22. Temperatura do dossel do canal medida ao amanhecer por sensores de infravermelho com ângulo de visada de 35° instalados no pivô central.

Figura 23. Temperatura do dossel do canal medida ao meio dia por sensores de infravermelho com ângulo de visada de 35° instalados no pivô central

Figura 24. Temperatura do solo do canal medida ao amanhecer por sensores de infravermelho com ângulo de visada de 35° instalados no pivô central

Figura 25. Temperatura do solo do canavial medida ao meio dia por sensores de infravermelho com ângulo de visada de 35° instalados no pivô central

Figura 26. Temperatura do dossel do canal medida ao amanhecer por sensores de infravermelho com ângulo de visada de 15° instalados no pivô central

Figura 27. Temperatura do dossel do canal medida ao meio dia por sensores de infravermelho com ângulo de visada de 15° instalados no pivô central

Figura 28. Temperatura do solo do canal medida ao amanhecer por sensores de infravermelho com ângulo de visada de 15° instalados no pivô central.

Figura 29. Temperatura do solo do canal medida ao meio dia por sensores de infravermelho com ângulo de visada de 15° instalados no pivô central.

Em função dos resultados obtidos nesse trabalho recomenda-se que seja realizada a modelagem da temperatura do dossel quando esta for obtida por sensores instalados no pivô central. Esta modelagem é necessária uma vez que a medição realizada em grandes áreas é afetada pelo tempo total que o pivô necessita para se deslocar por toda a área. O pivô utilizado no experimento possui dimensões menores que o comum e na área experimental o seu deslocamento na velocidade máxima levava cerca de 1h para cobrir 1 ha.

Pivôs com tamanho aproximado de 100 ha podem levar até mais de 24h para dar uma volta completa, a depender da lâmina de irrigação que será aplicada. Este tempo de deslocamento prejudica a leitura da temperatura, já que na maioria das aplicações dos dados de temperatura o ideal é obter estes valores da área como um todo em um mesmo horário do dia. O uso de superfícies de referência como a utilizada por Peters & Evett (2004), podem ser empregados com a finalidade de ajustar a temperatura para valores de medição em um mesmo horário.

Diversas metodologias tem empregado dados obtidos por satélites para a estimativa da evapotranspiração (ET), porém com um grau de detalhamento ainda pequeno, já que o pixel normalmente tem dimensões de 30x30 m. Esses dados são normalmente tomados em medidas instantânea da superfície, que com o auxílio de dados de campo, obtidos em estações meteorológicas, pode-se calcular a evapotranspiração. Baseando-se nesta abordagem, com o avanço da aplicação de sensores de baixo custo e com o desenvolvimento de novas metodologias para estimar a evapotranspiração, valores de ET poderão ser obtidos em uma escala muito mais detalhada.

5. CONCLUSÕES

Nas condições em que o experimento foi conduzido, conclui-se que:

- A temperatura medida por sensores de infravermelho instalados no pivô central apresentou valores próximos a temperatura medida pelos termopares quando o índice de área foliar foi maior que 2,7;
- Os sensores de infravermelho com ângulo de visão de 15° apresentam valores maiores de temperatura que os sensores com 35°;
- Em função do deslocamento do pivô, é necessário a modelagem da temperatura utilizando superfície de referência para minimizar a variação temporal e padronizar a temperatura obtida ao longo do deslocamento do pivô para uma medida instantânea.

REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E.; OLUFAYO, A. A. Evaluation of Two Temperature Stress Indices to Estimate Grain Sorghum Yield and Evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 96, p. 1282-1287, 2004.

ALFONSI, R. R.; PEDRO JR., M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, U. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar**; cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42-55.

ALI, M. H.; HOQUE, M. R.; HASSAN, A. A.; KHAIR, A. Effects of deficit irrigation on yield water productivity, and economic returns of wheat. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 92, n. 3, p. 151-161, 2007.

ALLEN, R. G., TASUMI, M., TREZZA, R., Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133 (4), p.380–394, 2007.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Rome: FAO**, 300 p. 1998. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ANGELOCCI, L. R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico. ESALQ, Piracicaba, 272p., 2002.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. In: PLANALSUCAR. Coordenadoria Regional Sul. Araras: COSUL, 1977. 122 p.

BITELLA, G.; ROSSI, R.; BOCHICCHIO, R.; PERNIOLA, M.; AMATO, M. A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**, v. 14, n. 10, p. 19639-19659, 2014.

BOCKHOLD, D. L.; THOMPSON, A. L.; SUDDUTH, K. A.; HENGGELE, J. C. Irrigation scheduling based on crop canopy temperature for humid environments. **Transactions of the ASABE**, v. 54, n. 6, p. 2021-2028, 2011.

BONNETT, G. D. Rate of leaf apperance in sugarcane, including a comparison of a range of varieties. **Journal Plant Physiology**, Amsterdam, n. 25, p. 829- 839, 1998.

BRUNINI, O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-Açúcar**. Campinas: IAC, 2010. p. 205-18.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A. V.; TATSCH, J. D.; FREITAS, H. C.; BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 5, p. 555-565, 2012.

CARVALHO, K. DOS S. **Medida e modelagem da evapo(transpi)ração de um canavial irrigado em função do manejo da palhada**. Piracicaba: USP, 2017. 114 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 2017.

CENSO VARIETAL 2018/2019 – RIDESA. Disponível em: <https://docs.wixstatic.com/ugd/097ffc_fba5a57ad8b24129935b31377b34b497.pdf>Acessado em: 21/08/2020

COELHO FILHO, M.A.; COELHO, R.D. & GONCALVES, A.C.A. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo em um pomar de lima ácida tahiti, irrigado por microaspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, p. 239-246, 2001.

COELHO, R. D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no brasil**. 2007. 192 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

COLAIZZI, P. D.; O'SHAUGHNESSY, S. A.; GOWDA, P. H.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; KUSTAS, W. P; ANDERSON, M. C. Radiometer footprint model to estimate sunlit and shaded components for row crops. **Agronomy Journal**. v.102, p. 942–955, 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2021. Brasília: **Conab**, 2021.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 197 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

EHRLER, W. L. Cotton leaf temperature as related to soil water depletion and meteorological factors. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 404-409, 1973.

ELMALOGLU, S.; SOULIS, K. X.; DERCAS, N. Simulation of Soil Water Dynamics Under Surface Drip Irrigation from Equidistant Line Sources. **Water Resources Management**, v. 27, n. 12, p. 4131–4148, 2014.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

EVANS, D. E.; SADLER, E. J.; CAMP, C. R.; MILLEN, J. A. Spatial canopy temperature measurements using center pivot mounted irts: **Coastal plains soil, and plant research center**. South Carolina, 2000.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. A.; DANTAS NETO, J. Índice de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F.; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; ARAÚJO NETO, R. A. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 18, n. 8, p. 798-804, 2014.

FRIZZONE, J. A.; MATIOLO, C. S. REZENDE, R., Gonçalves, A. C. A. Viabilidade econômica de irrigação suplementar em cana-de-açúcar, *sacharum spp.*, para região Norte do Estado de São Paulo. **Acta scientiarum Agronomy**, Maringá, v.23, n. 5, p. 1131-1137, 2001.

FRIZZONE, J.A. Planejamento da irrigação com uso de técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 1, n. 1, p. 24-49, 2007.

GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society **America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p.185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane response to water deficits. **Field Crops Research**, London, v.92, pp.185-202, 2005.

IRMAK, S.; HAMAN, D. Z.; BASTUG, R. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 6, p. 1221-1227, 2000.

IRVINE, J. E. Relations of photosynthetic rates and leaf and canopy characters to sugar cane yield. **Crop Science**, California, v. 15, p. 671-676, 1980.

JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress In: HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1982, p. 43-45.

JACKSON, R.D. Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. **Ann. Rev. Phytopathol.** v. 24, p. 265–287. 1986.

JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; PINTER, P.J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources**. Res. 17, 1133–1138, 1981.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução de José Carlos Neves Epiphânio (coord.). [et al.]. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011. 672 p.

JONES, H. G. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. **Advances in Botanical Research**, 41, 107-163. 2004.

KALMA, J. D.; MCVICAR, T. R.; & MCCABE, M. F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, p.421-469, 2008.

KALMA, J.D., JUPP, D.L.B., Estimating evaporation from pasture using infrared

KATSOULAS, N.; BAILLE, A.; KITTAS, C. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. **Agricultural and forest meteorology**, v. 106, n. 3, p. 233-247, 2001.

KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. **Hydrological Sciences**, v. 41, p. 495-516, 1996.

LARCHER, W. A planta sob estresse. In: LARCHER, W. Ecofisiologia vegetal. São Carlos, SP: Rima, 2000. p. 341-478.

LEBOURGEOIS, V.; CHOPART, J.L.; BÉGUÉ, A.; Le MÉZO, L. Towards using a thermal infrared index combined with water balance modelling to monitor sugarcane irrigation in a tropical environment. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.97, p.75-82, 2010.

LEUZINGER, S.; VOGT, R.; KÖRNER, C. Tree surface temperature in an urban environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.150, p.56-62, 2010.

MAHAN, J. R.; BURKE, J. J.; WANJURA, D. F.; UPCHURCH, D. R. Determination of temperature and time thresholds for BIOTIC irrigation of peanut on the southern high plains of Texas. **Irrigation Science**, New York, v. 23, n. 4, p. 145-152, 2005.

MAHAN, J. R.; YEATER, K. M. Agricultural applications of a low-cost infrared thermometer. **Computers and electronics in agriculture**, v. 64, n. 2, p. 262-267, 2008.

MANZATO, C., ASSAD, E.D., BACCA, J.F.M., ZARONI, M.J., PEREIRA, S.E.M., 2009. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; NASSIF, D. S. P.; 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.

Melexis Data Sheet. MLX90614 family, single and dual zone infrared thermometer in TO-39. Rev. 005, March 30, 2009.

MICHELS JR.; G.J., PICCINNI, G.; RUSH, C.M.; FRITTS, D. A. Using infrared transducers to sense greenbug (Homoptera: Aphididae) infestations in winter wheat. **Southwest. Entomol.**, V. 24, p. 269–279 1999.

MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in plant science**, v. 11, n. 1, p. 15-19, 2006.

MONTEITH, J.L. EVAPORATION AND ENVIRONMENT. **Symposium of Society of Experimental Biology**. v.19, p.205-234, 1965.

NASCIMENTO, P. S.; SILVA, J. A.; COSTA, B. R. S.; BASSOI, L. H. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1101-1113, 2014 .

NASSIF, D. S. P. Evapotranspiração, transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado. 2015. 123 p. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia de Sistemas Agrícolas) - - Escola Superior de Agricultura – Universidade de São Paulo, 2015.

NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; COSTA, L. G. Evapotranspiration and Transpiration Coupling to the Atmosphere of Sugarcane in Southern Brazil: Scaling Up from Leaf to Field. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 250-254, 2013.

NIXON, R.P., LYDA, S.D., HEILMAN, M.D., BOWEN, R.L., Incidence and control of cotton root rot observed with color infrared photography. **Texas Agricultural Experiment Station**, Texas A&M University, College Station, 4 pp. 1975.

O'SHAUGHNESSY, S. A.; HEBEL, M. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D. Evaluation of a wireless infrared thermometer with a narrow field of view. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.76, p. 59–68, 2011.

O'SHAUGHNESSY, S.A.; EVETT, S.R. Canopy temperature-based system effectively schedules and controls center pivot irrigation for cotton. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 1310–1316, 2010.

OLIVEIRA, E.C.A. de; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C. de; SIMÕES NETO, D.E.; ROCHA, A.T. da; CARVALHO, L.A. de. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.46, n.6, p.617-625, 2011.

OLIVEIRA, E.C.A.; OLIVEIRA, R.I.; ANDRADE, B.M.T.; FREIRE, F.J.; JÚNIOR, M.A.L.; MACHADO, P.R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.9, p.951–960, 2010.

OLIVEIRA, R. K.; FRAGA JUNIOR, L. S.; MOURA, L. B.; ROBERTI, D. R.; PILAU, F. G. Energy balance in a renewal sugarcane area with fallow period and soybean cultivation. **CIÊNCIA E NATUREA**, v. 42, p. e39, 2020.

PAUL, G., GOWDA, P. H., VARA PRASAD, P. V., Howell, T. A., Staggenborg, S. A., Neale, C. M. U., Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08. **Advances in Water Resources**, v.59, p.157–168, 2013.

PETERS, R.T., EVETT, S.R. Modeling diurnal canopy temperature dynamics using one-time-of-day measurements and a reference temperature curve. **Agronomy Journal**, v. 96, 1553–1561, 2004.

PETERS, R.T., EVETT, S.R. Spatial and temporal analysis of crop stress using multiple canopy temperature maps created with an array of center-pivot-mounted infrared thermometers. **Transactions of the ASAE**, v. 50, p. 919–927, 2007.

PINTER, P.J., FRY, K.E., GUINN, G., MAUNEY, J.R. Infrared thermometry: a remote sensing technique for predicting yield in water-stressed cotton. **Agricultural Water Management**. v. 6, p. 385–395, 1983.

POZDNYAKOVA, L., OUDEMANS, P.V., HUGHES, M.G., GIMENEZ, D. Estimation of spatial and spectral properties of phytophthora root rot and its effects on cranberry yield. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 37, p. 57–70, 2002.

QUEIROZ, T. M. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. Piracicaba: Tese Doutorado ESALQ-USP, 2007. 141 p.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane variedades. **Journal of Agronomy and Crop Science**, London, n. 4, v.185, p. 249-258, 2000.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Sciences**, v. 185: 249-258. 2000.

ROLIM, G. D. S.; CAMARGO, M. B. P. D.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. D. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

SADLER, E.J.; CAMP, C.R.; EVANS, D.E.; MILLEN, J.A. Corn canopy temperatures measured with a moving infrared thermometer array. **Transactions of the ASAE**, v. 45, p. 581–591, 2002.

SAMARASINGHE, G. B. Growth and yields of Sri Lanka's major crops interpreted from public domain satellites. **Agriculture Water Management**, v.58, p.145-157, 2003.

SEPULCRE-CANTÓ, G.; ZARCO-TEJADA, P. J.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J. A.; DE MIGUEL, E.; VILLALOBOS, F. J. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. **Agricultural and Forest meteorology**, v. 136, n. 1-2, p. 31-44, 2006.

SILVA, M.A.; CAPUTO, M.M. Ripening and the use of ripeners for better sugarcane management. p. 2-24. In: Marin, F.R., ed. Crop management: cases and tools for higher yield and sustainability. InTech, Rijeka, Croatia. 2012.

SILVA, T.G.F. da; MOURA, M.S.B. de; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; SOUZA, L.S.B. de; BRANDÃO, E.O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n. 2, p.139-147, 2011.

SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE JUNIOR, J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 171- 178, 2004.

SINCLAIR, T.R.; GILBERT, R.A.; PERDOMO, R.E.; SHINE, J.R.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Madison, v.88, p. 171-178, 2004.

SOARES, R. A. B. et al. Efeito da irrigação sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em início de safra. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 22, p. 38-41, 2004.

STANHILL, G. A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 8, p. 509–513, 1969.

SUI, R.; BAGGARD, J. Center-pivot-mounted sensing system for monitoring plant height and canopy temperature. **Transactions of the ASABE**, v. 61, n. 3, p. 831-837, 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 5. ed., Artmed, 2004. 918 p

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L. Satellite-Based Energy Balance to Assess Within Population Variance of Crop Coefficient Curves. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, n. 1, p. 94–109. 2005.

TATTERSALL, G. J. Thermimage: thermal image analysis. R package version 3.0.0, 2017.

thermometry: evaluation of a one-layer resistance model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 51, p. 223–246, 1990.

TOLER, R.W.; SMITH, B.D.; HARLAN, J.C. Use of aerial color infrared photography to evaluate crop disease. *Plant Dis.* v. 65, n. 1, p. 24–31. 1981.

TRENTIN, R. **Estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar com base na temperatura foliar**. 2010. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) –Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**. vol.31, n.6pp.1085-1095, 2011.

WANG, D.; GARTUNG, J. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.97, p.1.787-1.794, 2010.

YANG, X., SHORT, T. H., FOX, R. D., & BAUERLE, W. L. The microclimate and transpiration of a greenhouse cucumber crop. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, n. 6, p. 2143-2150, 1989.

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J.C. Sugarcane response to water-deficit stress during early growth on organic and sand soils. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, Vails Gate, v.5, p.403-414, 2010.