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

| Medida e modelagem da evapo(transpi)ração de um canavial irrigado em f | unção |
|--|-------|
| do manejo da palhada | |

Kassio dos Santos Carvalho

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

Kassio dos Santos Carvalho Engenheiro Agrícola e Ambiental

Medida e modelagem da evapo(transpi)ração de um canavial irrigado em função do manejo da palhada

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. FABIO RICARDO MARIN

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

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

Carvalho, Kassio dos Santos

Medida e modelagem da evapo(transpi)ração de um canavial irrigado em função do manejo da palhada / Kassio dos Santos Carvalho. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. Piracicaba, 2017.

114 p.

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

1. Saccharum officinarum 2. Transpiração 3. Penman-Monteith 4. Fluxo de seiva 5. Evaporação I. Título

DEDICATÓRIA

A minha mãe Maria Abadia, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", ao Departamento de Engenharia de Biossistemas e ao PPG em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade de realização do doutorado.

A todos os contribuintes e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que repassou os recursos por meio do financiamento do processo número 1493561/2014-5.

A toda a minha família que sempre me apoiaram e em especial a minha amada esposa, Amanda Charpeletti.

Ao amigo e orientador Prof. Fábio R. Marin pela orientação, paciência e ensinamentos.

Ao meu co-orientador Prof. Marcos Vinícius Folegatti, pela ajuda e amizade e orientação prestada.

Aos professores Luiz R. Angelocci, Daniel S. P. Nassif e Rubens D. Coelho, pelas valiosas sugestões apresentadas no exame de qualificação.

Ao amigo e companheiro de condução do experimento Murilo S. Vianna, pelos ensinamentos, parceria e muita ajuda.

A todos que me auxiliaram no trabalho de campo, em especial ao, Lino, Gabi, Rodolfo, Pedro, Lucas, Júlio, Leandro, João Francisco, Bruno Lena e Bruno Araújo.

Aos técnicos, Fernando, Davilmar, Gilmar, Áureo, Ângela, Juarez, Afonso e Robinho pelo apoio sempre que precisei.

A todos que de alguma forma auxiliaram neste projeto.

Epígrafe

Plano de trabalho para a vida toda, por Eduardo Zugaib.

- "1. Faça o que é certo, não o que é fácil. O nome disso é Ética.
- 2. Para realizar coisas grandes, comece pequeno. O nome disso é Planejamento.
- 3. Aprenda a dizer 'não'. O nome disso é Foco.
- 4. Parou de ventar? Comece a remar. O nome disso é Garra.
- 5. Não tenha medo de errar, nem de rir dos seus erros. O nome disso é Criatividade.
- 6. Sua melhor desculpa não pode ser mais forte que seu desejo. O nome disso é Vontade.
- 7. Não basta iniciativa. Também é preciso ter 'acabativa'. O nome disso é Efetividade.
- 8. Se você acha que o tempo voa, trate de ser o piloto. O nome disso é Produtividade.
- 9. Desafie-se um pouco mais a cada dia. O nome disso é Superação.
- 10. Pra todo 'game over', existe um 'play again'. O nome disso é Vida."

Sumário

| RESUMO | 8 |
|---|----|
| ABSTRACT | 9 |
| Lista de figuras | 10 |
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 2. OBJETIVOS | |
| 2.1. OBJETIVOS GERAIS | 19 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 19 |
| 3. REVISÃO DE LITERATURA | 21 |
| 3.1. ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR | 21 |
| 3.2. MANEJO DA PALHADA DA CANA DE AÇÚCAR | 24 |
| 3.3. EVAPORAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO | 27 |
| 3.4. TRANSPIRAÇÃO | 29 |
| 3.5. FLUXO DE SEIVA | 30 |
| 3.6. RESISTÊNCIA FOLIAR À DIFUSÃO DE VAPOR | 33 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 37 |
| 4.1. ÁREA EXPERIMENTAL | 37 |
| 4.2. IRRIGAÇÃO | 38 |
| 4.3. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL | 39 |
| 4.4. TRATOS CULTURAIS | 40 |
| 4.5. BIOMETRIA | 41 |
| 4.6. TEOR DE CLOROFILA | 42 |
| 4.7. FLUXO DE SEIVA (FS) | 43 |
| 4.8. SALDO DE RADIAÇÃO NO DOSSEL | 45 |
| 4.9. RESISTÊNCIA AERODINÂMICA | 47 |
| 4.10. RESISTÊNCIA DE COBERTURA | 47 |
| 4.11. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA | 51 |
| 4.12. MODELO DE PENMAN-MONTEITH | 52 |
| 4.13. RESISTÊNCIA FOLIAR A DIFUSÃO DE VAPOR | 53 |
| 4.14. MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN | 54 |
| 4.15. MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO | 56 |

| | 4.16. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA CONFORME O BALANÇO HÍDRICO DO SOLO | 58 |
|----|--|--|
| | 4.17. EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO | |
| | 4.18. FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS | |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 61 |
| | 5.1. CARACTERÍSTICAS BIOMÉTRICAS DA CULTURA E ANÁLISES TECNOLÓGICAS 5.1.1. PERFILHAMENTO 5.1.2. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR 5.1.3. TEOR DE CLOROFILA 5.1.4. COMPRIMENTO DE COLMO 5.1.5. MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA 5.1.6. MASSA SECA DA PARTE AÉREA 5.1.7. MASSA FRESCA DE COLMO 5.1.8. MASSA SECA DE COLMO 5.1.9. PRODUTIVIDADE FINAL 5.1.10. ANÁLISES TECNOLÓGICAS | 61 63 64 65 66 67 68 |
| | 5.2. FLUXO DE SEIVA | |
| | 5.3. CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA | 75 |
| | 5.4. CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO | 78 |
| | 5.5. COEFICIENTE DE CULTURA | 80 |
| | 5.6. ANÁLISE E ESTIMATIVA DAS VARIÁVEIS DO MODELO DE PENMAN- MONTEITH | 82 85 85 |
| | 5.7. EVAPORAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO | 91 |
| | 5.8. TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DA CULTURA BASEADA NO MODELO DE PENMAN-MONTHEITH | |
| | 5.9. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA | 94 |
| 6. | CONCLUSÕES | 97 |
| ρı | FEEDÊNCIAS | aa |

RESUMO

Medida e modelagem da evapo(transpi)ração de um canavial irrigado em função do manejo da palhada

A cultura da cana é importante para o agronegócio brasileiro. O manejo adequado da palhada da cana-de-acúcar no solo pode influenciar no desenvolvimento e no crescimento da cultura, podendo resultar em ganhos ambientais e econômicos. Neste trabalho, objetivou-se avaliar o efeito do manejo com palha (CP) e sem palha (SP) na evapotranspiração de um canavial irrigado. Um experimento foi conduzido em canavial irrigado com dois tratamentos (mantendo-se 100% da palhada e sem cobertura de palha sobre o solo). Neste experimento, a evapotranspiração foi medida a partir do balanço hídrico "in situ" do solo (ETc-BHS) e pelo método da razão de Bowen (ETc-MRB) e a transpiração utilizando-se sensores de fluxo de seiva (FS). A evaporação do solo foi estimada com base em dados da cultura e meteorológicos. A modelagem da transpiração e de seus componentes baseou-se na abordagem no "modelo da grande folha" ("big leaf model") proposto por Monteith. Para tanto, foram definidos e avaliados submodelos para a simulação do saldo de radiação no dossel, da resistência aerodinâmica, da resistência de cobertura no ambiente da cultura. Ao longo do ciclo da cultura, análises biométricas foram realizadas a cada 30 dias e esses dados utilizados na parametrização do modelo. O desempenho dos submodelos e do modelo parametrizado de Penman-Monteith (PM) foi estatisticamente avaliados. Avalia-se um modelo para estimativa da evaporação em função da cobertura da palhada. O cultivo de cana-de-acúcar utilizando os resíduos vegetais favorece o incremento da transpiração, da evapotranspiração da cultura (ETc) e reduz a evaporação de água no solo. A palha influenciou as variáveis biométricas da cultura, como perfilhamento, massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA). Ao relacionar a transpiração estimada com o modelo de PM com a medida com FS, verifica-se um coeficiente de determinação (R²) de 0,72 e de 0,48 e um coeficiente angular (a) de 1,22 e 0,92, para a área manejada CP e SP, respectivamente. A evaporação de água no solo é maior na área SP, principalmente nos períodos com precipitações acima de 40 mm. Quando se relaciona a ETc-BHS e a ETc-MRB com a ETc estimada com base no método de PM, nota-se um R² de 0,67 e 0,54 na área CP e 0,59 e 0,54 para a área SP, respectivamente. Independente do manejo adotado, aos 302 dias após o corte, o canavial apresentou ATR, POL e % de fibra ideal para a comercialização. O teor de clorofila na área manejada CP é superior ao manejado SP. O cultivo de cana-de-acúcar utilizando os resíduos vegetais favorece o incremento da transpiração, da ETc e reduz a evaporação de água no solo.

Palavras-chave: Saccharum officinarum; Transpiração; Penman-Monteith; Fluxo de seiva; Evaporação

ABSTRACT

Evapo(transpi)ration measument and modeling of irrigated sugarcane depending on trash management

Cane culture is important for Brazilian agribusiness. Proper management of sugarcane trash in the soil can influence the development and growth of the crop, which can result in environmental and economic gains. The objective of this study was to evaluate the effect of trash management (CP) and without trash (SP) on the evapotranspiration of an irrigated sugar cane. An experiment was conducted in irrigated sugar cane fields with two treatments (100% of the trash and without trash cover on the soil). In this experiment, evapotranspiration was measured from soil water balance (ETc-BHS) and the Bowen ratio method (ETc-MRB) and transpiration using sap flow sensors (FS). Soil evaporation was estimated based on crop and meteorological data. The modeling of the transpiration and its components was based on the approach in the "big leaf model" proposed by Monteith. For that, submodels were defined and evaluated for the simulation of canopy radiation balance, aerodynamic resistance, and cover resistance in the culture environment. Throughout the crop cycle, biometric analyzes were performed every 30 days and these data were used in the parameterization of the model. The performance of the submodels and the parameterized model of Penman-Monteith (PM) was statistically evaluated. A model for estimation of evaporation is evaluated as a function of the trash cover. The cultivation of sugarcane using the vegetal residues favors the increase of transpiration, evapotranspiration of the crop (ETc) and reduces the evaporation of water in the soil. The trash influenced the biometric variables of the crop, such as tillering, fresh mass of aerial part (MFPA) and dry mass of aerial part (MSPA). When correlating the estimated transpiration with the PM model with the FS measurement, it is verified a determination coefficient (R²) of 0.72 and 0.48 and an angular coefficient (a) of 1.22 and 0.92, for the managed area CP and SP, respectively. The water evaporation in the soil is higher in the SP area, especially in periods with rainfall above 40 mm. When ETc-BHS and ETc-MRB are related to ETc estimated on the basis of the PM method, an R2 of 0.67 and 0.54 is observed in the CP area and 0.59 and 0.54 for the area SP, respectively. Regardless of the management adopted, at 302 days after cutting, the sugarcane plantation presented ATR, POL and% of fiber ideal for commercialization. The chlorophyll content in the managed area CP is superior to the managed SP. The cultivation of sugarcane using the vegetal residues favors the increase of the transpiration, ETc and reduces the evaporation of water in the soil.

Keywords: Saccharum officinarum; Transpiration; Penman-Monteith; Sap flow; Evaporation

LISTA DE FIGURAS

| método do balanço de calor, em que P é o calor aplicado ao sensor; Qs e Qi são os fluxos axiais de calor para cima e para baixo do sensor respectivamente; Qr é o calor dissipado radialmente; Qa é o calor armazenado no segmento de caule amostrado e Qf é o calor conduzido pela seiva (MARIN et al., 2008). |
|---|
| Figura 2. Esquema da associação das resistências à difusão de vapor na folha. r^{Est}_{va} é a resistência estomática à difusão de vapor; r^{eia}_{va} é a resistência dos espaços intercelulares de ar; r^{cut}_{va} é a resistência cuticular (MARIN 2003a) 34 |
| Figura 3. Área experimental, canavial delimitado na cor vermelha com hachuras (A) e tipo de solo do experimento e área de abrangência do pivô (B), localizada na fazenda Areão da ESALQ-USP, município de Piracicaba – SP 38 |
| Figura 4. Sistema de irrigação por pivô central utilizado no experimento em dois estágios de desenvolvimento do canavial experimental da Fazenda Areão, município de Piracicaba – SP |
| Figura 5. Representação esquemática da área experimental, com a localização do pivô central, das torres para avaliação da evapotranspiração em cada tratamento (T1) CP e (T2) SP, posicionamento dos tubos de acesso para a sonda Diviner 2000, direção predominante dos ventos e fonte de captação de energia elétrica para alimentação dos instrumentos instalados na área 40 |
| Figura 6. Vista da parcela mantida com palha sobre o solo e tratos culturais com enleirador (A) e vista da parcela SP e tratos culturais pelo escarificador (B), utilizados no experimento, localizado na Fazenda Areão, município de Piracicaba – SP |
| Figura 7. Colheita do canavial manejado CP e SP, Piracicaba-SP 42 |
| Figura 8. Esquema de numeração de folhas pelo sistema de Kuijper, adaptado pelo por Rossetto, (2016) |
| Figura 9. Sensores de fluxo de seiva instalados no canavial, antes de ser envolvido com papel alumínio e filme (A) e depois de ser envolvido (B) 44 |
| Figura 10. Termopar instalado sob a folha para determinação da temperatura foliar50 |
| Figura 11. Determinação da resistência estomática com porômetro de equilíbrio dinâmico modelo Delta T, AP453 |
| Figura 12. Tubos de acesso da sonda Diviner 2000, no tratamento CP (A) e SP (B) |
| Figura 13. Sonda de monitoramento da umidade Diviner 2000 (A) e calibração da sonda em laboratório (B) |

| Figura 14. Determinação da profundidade do sistema radicular (A) e coleta das amostras indeformadas do solo (B)59 |
|--|
| Figura 15. Número de perfilho por parcela, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 2015, de um canavial manejado CP e SP62 |
| Figura 16. Evolução do índice de área foliar ao longo de dias após o corte, de um canavial manejado CP e SP63 |
| Figura 17. Comprimento do colmo (cm), no período de agosto de 2014 a fevereiro de 2015, de um canavial manejado CP e SP65 |
| Figura 18. Massa fresca da parte aérea (MFPA), no período de outubro de 2014 a maio de 2015, de um canavial manejado CP e SP66 |
| Figura 19. Massa fresca da parte aérea (MFPA), no período de outubro de 2014 a maio de 2015, de um canavial manejado CP e SP67 |
| Figura 20. Massa fresca de colmo, no período de dezembro de 2014 a maio de 2015, de um canavial manejado CP e SP68 |
| Figura 21. Massa seca colmo, no período de dezembro de 2014 a maio de 2015, de um canavial manejado CP e SP69 |
| Figura 22. Açúcar teoricamente recuperável (ATR) (A) e porcentagem de massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada (POL) (B), de um canavial manejado CP e SP71 |
| Figura 23. Porcentagem de fibra contida nos colmos da cana-de-açúcar, de um canavial manejado CP e SP72 |
| Figura 24. Fluxo de seiva (FS) de um canavial manejado CP e SP, do dia 21 de março ao dia 6 de maio de 2015 (A) e variação horaria do fluxo de seiva no dia 25 de março de 2015 (B)73 |
| Figura 25. Relação entre o saldo de radiação (Rn) e o fluxo de seiva (FS), em um canavial manejado SP, (A) e CP, (B)75 |
| Figura 26. Variação horária da condutância estomática (gs) de um canavial manejado CP e SP, nos meses de novembro e dezembro de 2014 e janeiro, fevereiro, março e abril de 2015 em Piracicaba77 |
| Figura 27. Umidade volumétrica do solo (Θ) na camada de 0 a 80 cm, no período de agosto de 2014 a fevereiro de 2015, de um canavial manejado CP e SP79 |
| Figura 28. Umidade volumétrica do solo (Θ) na camada de 0 a 20 cm (A), 20 a 40 cm (B), 40 a 60 cm (C) e de 60 a 80 cm (D), no período de 17 DAC a 300 DAC, de um canavial manejado CP e SP80 |
| Figura 29. Coeficiente de cultivo, (obtido por meio da determinação da evapotranspiração real da cultura usando o balanço hídrico do solo e a |

| evapotranspiração de referência, usando o método de Penman Monteith), em relação ao DAC, de um canavial manejado CP e SP |
|---|
| Figura 30. Evolução horária do saldo de radiação líquido (Rn), do balanço de energia do canavial (Rnef), acima da copa (Rnac) e do saldo de radiação global (Qg), num dia com elevada incidência de radiação, aos 268 DAC e num dia nublado, aos 204 DAC, de um canavial manejado CP (A) e SP (B) |
| Figura 31. Relação entre o saldo de radiação de um gramado e o saldo de radiação efetivo do canavial (A e C) e pelo saldo de radiação acima do canavial (B e D), de um canavial manejado CP e SP |
| Figura 32. Relação entre o saldo de radiação global (Qg) e o saldo de radiação efetivo do canavial (A e C) e o saldo de radiação acima do canavial (B e D), de um canavial manejado CP e SP85 |
| Figura 33. Relação entre os valores de resistência aerodinâmica estimada com o modelo de Stokes et al., (2016) e a velocidade do vento ajustada a 10 m, de um canavial manejado CP (A) e SP (B)86 |
| Figura 34. Variação horária da resistência estomática (rc) medida em relação aos valores de resistência estomática estimada (est), de um canavial manejado CP e SP, nos meses de novembro e dezembro de 2014 e janeiro, fevereiro, março e abril de 2015 em Piracicaba |
| Figura 35. Relação entre a resistência estomática medida e a resistência estomática estimada de um canavial de um canavial manejado CP (A) e SP (B). |
| Figura 36. Variação da temperatura da cobertura da cana-de-açúcar estimada e media em relação aos DAC (A e B) e relação entre a temperatura medida (Tf-med) e estimada (Tf-est) (C e D), de um canavial manejado CP e SP |
| Figura 37. Precipitação e irrigação acumulada nos intervalos entre uma medida de umidade do solo e outra e evaporação de água no solo, de um canavial manejado com palha (Es-cp) e sem palha (Es-sp) |
| Figura 38. Variação da transpiração estimada com modelo de Monteith (1965) e medida com sensores de fluxo de seiva ao longo de vários dias após o corte (A e B) e a relação entre a transpiração estimada e medida (C e D) de um canavial manejado CP e SP. |
| Figura 39. Relação entre a evapotranspiração da cultura estimada com base no modelo de PM e media com o método da razão de Bowen (A e B) e com o método do balanço hídrico do solo (C e D), de um canavial manejado CP e SP. |
| |

LISTA DE TABELAS

| Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental37 |
|---|
| Tabela 2. Caracterização química das folhas de cana-de-açúcar38 |
| Tabela 3. Condicionais para a avaliação dos dados para o método da razão de Bowen (adaptado de PEREZ et al., 1999)55 |
| Tabela 4. Média mensal, do número de perfilhos por parcelas, de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 201561 |
| Tabela 5. Índice de área foliar, média mensal, de um canavial manejado CP e SP, no período de setembro de 2014 a março de 201562 |
| Tabela 6. Teor de clorofila de um canavial manejado CP e SP64 |
| Tabela 7. Média mensal, do comprimento de colmo por parcelas, de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 2015. |
| Tabela 8. Média mensal, massa fresca da parte aérea (t ha ⁻¹), de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a maio de 201565 |
| Tabela 9. Média mensal, massa seca da parte aérea (t ha ⁻¹), de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a maio de 201566 |
| Tabela 10. Média mensal, massa fresca de colmo (t ha ⁻¹), de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 201567 |
| Tabela 11. Média mensal, massa seca de colmo (t ha ⁻¹), de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 201569 |
| Tabela 12. Produtividade do canavial manejado CP e SP70 |
| Tabela 13. Síntese dos valores de análise de variância e do teste de Tukey a p<0,05, para a transpiração acumulada, durante cinco períodos de 9 dias73 |
| Tabela 14. Síntese da análise de variância e do teste de Tukey (p<0,05) para a condutância estomática, no período de novembro de 2014 a abril de 2015, comparando-se o tratamento CP e SP76 |
| Tabela 15. Conteúdo de água no solo na camada de 0 a 80 cm, média mensal, de um canavial manejado CP e SP, no período de agosto de 2014 a fevereiro de 2015 |

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo que a produção total de cana-de-açúcar moída na safra 2014/15 foi de 634,8 milhões de toneladas, com redução de 3,7% em relação à safra 2013/14. A produção de cana-de-açúcar da Região Centro-Sul foi de 575,4 milhões de toneladas, 4,4% menor que a produção da safra anterior. A Região Norte/Nordeste teve aumento de 4,7%, passando de 56,7 milhões de toneladas na safra 2013/14, para 59,4 milhões na safra 2014/15 (CONAB, 2015).

Sob o sistema de colheita de cana crua e mecanizada, a cana-de-açúcar pode acumular grande quantidade de resíduos sobre o solo, a qual pode se constituir numa fonte de nutrientes, reduzir a água perdida por evaporação, e melhorar a sustentabilidade da cadeia produtiva (FORTES, 2010). Portanto, a ampliação da compreensão do impacto da manutenção dessa camada de resíduos culturais sobre o sistema de cultivo é importante para melhorar formulação de estratégias de gerenciamento agrícola em diferentes sistemas de produção (OLIVIER & SINGELS, 2012). Em todo o mundo, a agricultura irrigada está sob pressão para demonstrar que os recursos hídricos vêm sendo usados de forma eficiente e, possivelmente, a retenção dessa camada de resíduos possa interferir sobre a evaporação e o nível de umidade do solo, alterando o manejo da irrigação (OLIVIER & SINGELS, 2012).

A transpiração vegetal é um componente do balanço de energia que influi sobre a temperatura do sistema, com efeito especial sobre o tecido 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 (LEUZINGER et al., 2010). A literatura é abundante em demonstrar que na medida em que a água se torna limitante a transpiração é reduzida, ocorrendo o aumento da temperatura foliar pela absorção da radiação solar incidente (EMEKLI et al., 2007; GONTIA & TIWARI, 2008; WANG & GARTUNG, 2010).

Apesar do longo tempo de pesquisas sobre a transpiração, sua modelagem ainda não é uma tarefa trivial, especialmente pelos diversos fatores determinantes sobre ela. Monteith (1965) propôs o modelo da grande folha e este é ainda um paradigma para a modelagem biofísica deste processo. De acordo com este modelo,

a transpiração vegetal de uma planta sem limitação hídrica poderia ser modelada com base em quatro variáveis principais: o balanço de energia do dossel (Rn), a resistência aerodinâmica (ra), a resistência foliar à difusão de vapor (rc) e o déficit de pressão de vapor do ar no ambiente da cultura (Δ e).

A rc se trata de uma variável de suma importância no controle da transpiração foliar, mas ainda pouco estudada na cana-de-açúcar. Mesmo em outras culturas, o número relativamente pequeno de estudos de rc é decorrente da sua alta variabilidade espaço-temporal e da dificuldade instrumental para sua medida. Atualmente, a disponibilidade de equipamentos para medida direta da transpiração da planta com sensores de fluxo de seiva (Marin et al., 2008), em associação com porômetros, permite caracteriza-la suficientemente de modo que submodelos possam ser desenvolvidos para a estimativa de rc sem necessidade de medida (MARIN et al. 2003a). Sobre ra, ainda é difícil estuda-la em condições de campo pela falta de instrumental disponível para este tipo de análise, como túneis de vento ou perfis micrometeorológicos de grande porte. Os estudos sobre Rn e Δe são relativamente mais simples para culturas com cobertura contínua do terreno, uma vez que ela pode ser medida com saldo-radiômetros e termômetros de custo relativamente baixo, permitindo então o desenvolvimento de métodos específicos para estimativa (ANGELOCCI et al., 2008). Admitindo-se que essas quatro variáveis estejam adequadamente arranjadas no modelo da grande folha, é possível parametrizar modelos mais gerais para estimativa da evaporação do solo e transpiração das plantas sem a necessidade de uso dos coeficientes de cultivo (Kc). Exemplos dessa abordagem foram feitos em macieiras (Angelocci, 1997; Green et al., 1995), ameixeiras (Green, 1993); limoeiros (Daamen et al. 1999; Marin et al, 2003a) e cafeeiros (Marin et al., 2003c), resultando em estimativas de consumo hídrico e necessidade de irrigação mais adequadas e com menos incerteza em relação ao uso de Kc. Trabalhos nesta linha têm utilizado o modelo de Penman-Monteith (Monteith, 1965) como base de trabalho, utilizando-o diretamente para estimativa da evapotranspiração da cultura considerando as especificidades da cultura. De acordo com Smith (1991) a aplicação do modelo de Penman-Monteith é indicada por tratar-se de um modelo mecanístico físico-matemático, que dispensa acomodações empíricas em seu desenvolvimento e que pode ser aplicado a qualquer tipo de superfície evapotranspirante, desde que sejam determinadas

adequadamente suas variáveis de entrada (rc, ra, Rn e o déficit de pressão de vapor do ar no ambiente da cultura Δ e).

Como já mencionado, um aspecto interessante do sistema de produção de cana-de-açúcar do Brasil é a possibilidade de manutenção da palha sobre o solo, com forte efeito principalmente sobre a evaporação do solo e o desenvolvimento inicial da cultura. A modelagem da evaporação, portanto, também é importante para ampliar a base de conhecimento para sua adequada quantificação. Com isso, seria possível quantificar o efeito da palha no uso da água pela cultura e considerar este aspecto no desenvolvimento de modelos de evapotranspiração. Este tipo de abordagem também permite a melhoria dos modelos de crescimento da cultura, uma vez que normalmente os algoritmos disponíveis para simulação da evaporação do solo e transpiração da planta são relativamente pobres tendo em vista a limitação de dados básicos envolvendo o fluxo de seiva e a resposta estomatal ao ambiente. Assim, tem-se um segundo ganho desse tipo de abordagem, que é a disponibilização de uma nova rotina de simulação que poderá ser apropriada por outros modelos já disponíveis (e.g. DSSAT/Canegro e APSIM-Sugar) ou mesmo por modelos que ainda estão em fase de desenvolvimento (MARIN & JONES, 2014).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Modelar a transpiração e a evaporação de um canavial considerando o efeito da manutenção dos resíduos culturais sobre a superfície do solo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar submodelos para estimativa das variáveis de entrada do método de Penman-Monteith (rc, ra, Rn e Δ e) adaptados à cana-de-açúcar;

Parametrizar o modelo de Penman-Monteith e suas variáveis de entrada para estimativa direta da evapotranspiração de canaviais e avaliar seu desempenho em comparação com dados medidos.

Parametrizar e avaliar um modelo para estimativa da evaporação da água do solo de um canavial irrigado sob duas condições de manejo da palhada;

Estudar o fracionamento da evapotranspiração em transpiração e evaporação, com e sem remoção da palha.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Quando Lineu (1753) elaborou o sistema de classificação vegetal, foi descrita duas espécies de cana-de-açúcar, a *Saccharum Officinarum* e a *Sacharum Spicatum*. Atualmente, as espécies de cana-de-açúcar existentes são classificadas como *S. spontaneum*, *S. officinarum*, *S. sinensis*, *S. barberi* e *S. robustum*, pertencentes à família das Poaceas (MARIN et al., 2009). A família das Poaceas, também representada pelo milho, sorgo, arroz e outras gramas, tem como principal característica a forma da inflorescência (espiga), o crescimento do caule em colmos, e as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta.

Segundo a literatura mais antiga, a cana-de-açúcar seria originária de regiões próximas à Índia. Em estudos recentes, porém, levanta-se a hipótese de que a cana-de-açúcar teria uma história mais remota, com indícios de que teriam sido os povos das ilhas do Sul do Pacífico, há mais de 20 mil anos, a descobrir as propriedades desta planta, que crescia espontaneamente em suas terras. A Nova Guiné teria cultivado pela primeira vez e, a partir daí, a cultura teria se estendido para a Índia, à região do Golfo de Bengala, de onde se tem os mais antigos registros sobre a sua existência (IVO et al., 2008).

Introduzida no Brasil pelos portugueses, a cana-de-açúcar torna-se, já no período colonial, uma das principais fontes de geração de recursos financeiros para o reino português pelo grande valor do açúcar no mercado internacional, tendo sua produção incentivada pela Coroa. Oficialmente, foi Martim Affonso de Souza que, em 1532, trouxe a primeira muda de cana ao Brasil e iniciou seu cultivo na Capitania de São Vicente. Lá ele próprio construiu o primeiro engenho de açúcar, denominado de "Governador", em 1533. Mas foi efetivamente no Nordeste do Brasil, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia que os engenhos de açúcar se multiplicaram. Era o início de uma indústria que encontrou no Brasil, dentre todas as nações que mais tarde também se tornariam produtoras, seu campo mais fértil para uma rápida expansão e perpetuação por quase quinhentos anos sem interrupção (GALVÃO, 2009).

O Brasil não é só o maior produtor da cultura, seguido por Índia e China, como também o maior produtor de açúcar e etanol de cana-de-açúcar, chegando a

produzir mais de 50% do açúcar comercializado no mundo. Apesar de pouco mais de 50% da produção estar concentrada em São Paulo, a cultura é cultivada em todas as regiões do país. De um modo geral, o país tem dois calendários de colheita, um para a Região Nordeste, que vai de setembro a abril e outro para o restante do país, de maio a novembro (CONAB, 2015).

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, porém é comum que seja considerada uma cultura anual em trabalhos científicos, ou seja, os efeitos das adubações e outros tratamentos são avaliados em somente um ano agrícola (FORTES, 2010). Essa cultura é composta basicamente pela parte subterrânea (raízes e rizomas) e parte aérea (folhas, colmos, inflorescências e sementes).

O sistema radicular da cana se desenvolve em maior profundidade que outras culturas, principalmente anuais, por ser semiperene. Este sistema é formado por rizomas e raízes fasciculadas, das quais 85% se encontram na camada de 50 cm de profundidade e 60% na camada de 20 a 30 cm (OLIVEIRA FILHO et al. 2015).

O colmo é caracterizado por nós bem marcados e entrenós distintos e fica acima do solo. O colmo é responsável pela sustentação das folhas e das panículas e o seu porte pode ser ereto, semiereto, semiereto ou decumbente, dependendo da idade da planta. O entouceiramento pode ser fraco, médio ou forte (Mozambani et al, 2006).

Conforme esses autores, a inflorescência típica da cana-de-açúcar é uma panícula aberta, denominada bandeira ou flecha. As flores muito pequenas formam espigas florais agrupadas em panículas e rodeadas por longas fibras sedosas congregando-se em enormes pendões terminais de coloração cinza-prateada. É formada por um eixo principal, a raque, a partir da qual originará ramificações secundárias e terciárias, onde se encontram pares de espiguetas, sendo uma séssil (sem pedicelo) e outra pedicelada. Em cada espigueta encontra-se uma flor que produzirá um fruto. O fruto, resultante da fecundação da flor e cana-de-açúcar, é do tipo cariopse, com dimensões aproximadas de 1,5 x 0,5 mm, apresentando uma depressão na região do embrião.

As folhas são responsáveis pela interação da planta com a atmosfera, trocando gases e vapor d'água através dos estômatos que abrem e fecham em função da turgidez das células-guarda, onde estão os cloroplastos, onde é realizada a fotossíntese, incorporando o carbono atmosférico e transformando-o em carboidratos de alto valor energético, fundamentais para o seu metabolismo, pela

captação da radiação solar e sua transformação em energia química. As folhas são alternadas, opostas e presas aos nos dos colmos, e podem ser basicamente divididas em duas partes, a parte superior conhecida como lâmina e a inferior, envolvendo o colmo, chamada de bainha (SCARPARI & BEAUCLAIR, 2008).

As variedades não são descritas exclusivamente a partir de suas características morfológicas, mas também por características agroindustriais. Como exemplos de características agroindustriais citam-se: precocidade, capacidade de brotação e de perfilhamento, adaptabilidade à época de plantio, restrição ao ambiente de produção, tolerância à seca, produtividade e qualidade (COSTA et al., 2012).

A cultura tem também papel ambiental muito importante, pois o álcool combustível apresenta vantagens ambientais e socioeconômicas claras em relação à gasolina. Desconsiderando-se o uso de catalisadores, o álcool trata-se de um combustível mais limpo do que seu substituto, a gasolina, pois possui menores fatores de emissão para poluentes de efeito local. Além disso, é proveniente de uma fonte renovável, a cana-de-açúcar, resultando em emissões líquidas de gases precursores do efeito estufa potencialmente nulas por seu conteúdo de carbono ser reciclado (Leme, 2004).

Apesar da rusticidade da cultura, ela defronta-se com uma série de problemas agronômicos, incluindo a incidência de pragas e, em particular, a presença da broca da cana *Diatraea saccharalis* Fabr. (Lepidoptera: Crambidae) uma das mais importantes pragas da cana-de-açúcar no Brasil, com capacidade de redução expressiva da produtividade em campo e da qualidade da matéria prima (Dinardo-Miranda, 2008). Com relação aos danos, Guagliumi (1972/73) e Gallo et al. (1988) reportaram que as lagartas se alimentam nos primeiros dias dos tecidos foliares, penetrando, em seguida, no interior dos colmos. Seus prejuízos diretos originam-se das galerias que fazem nos colmos, provocando perda de peso e tombamento da planta pelo vento, entre outros. Indiretamente, favorecem a penetração de fungos nas plantas, causando a podridão vermelha do colmo, levando à inversão da sacarose e diminuição da produção de álcool (BOIÇA et al. 1997).

O cultivo da cana, quando é queimada, pode retira do solo a proteção contra os impactos direto das gotas quando ocorrem chuvas intensas, aumenta perda de água por evaporação, reduz a capacidade de retenção de água, além de facilitar o desenvolvimento das plantas invasoras (DELGADO, 1995). Em contrapartida, a sua

adoção beneficia as operações de preparo do solo na renovação dos canaviais, de cultivo mecânico das socarias, promove o controle da cigarrinha e de outras pragas da cultura, além, é claro, de facilitar a sua colheita, seja ela feita de forma manual, seja mecanizada.

3.2. MANEJO DA PALHADA DA CANA DE AÇÚCAR

Devido os impactos ambientais causados pelas queimadas, o protocolo agroambiental do setor sucroalcooleiro propôs o fim gradativo da colheita com despalha a fogo. Com isso em 2002, surgiu a lei Estadual nº 11.241 que trata da queima da cana. Segundo essa lei, a queima do canavial deveria ter sido eliminada até 2021 para as áreas mecanizáveis e até 2031 para as áreas com declividade superior a 12% no Estado de São Paulo. Esta meta foi contudo renegociada para que o fim da queima em áreas mecanizáveis fosse em 2014 e em áreas com declividade acima de 12% em 2017(RIPOLLI & RIPOLLI, 2004). Por fatores econômicos e pela legislação vigente, houve um incremento na área de colheita da cana crua, com grande quantidade de palha depositada sobre o solo, que pode atuar como reserva de nutrientes devido à decomposição da matéria orgânica (JENDIROBA, 2006). Dessa forma, a palhada da cana de acúcar, guando mantida sobre o solo, tem a capacidade de promover modificações nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Além disso, a presença de uma camada de palha sobre o solo pode reduzir a perda de água por evaporação. Atualmente, estima-se que mais de 80 % da cana-de-açúcar brasileira já seja colhida mecanicamente.

Dentre os efeitos da palha sobre regime hídrico do canavial, Sousa et al., (2012) observou que as perdas de solo, água e nutrientes diminuíram com o aumento da quantidade de palha de cana-de-açúcar na superfície do solo, diminuiu também as perdas de solo, água e nutrientes por erosão em entre sulcos. A camada de palha que cobre a superfície do solo atua também dissipando a energia cinética da chuva e impedindo o impacto direto das gotas sobre o solo. Ela também funciona como obstáculo ao escorrimento superficial da água e, consequentemente, impede o arrastamento de partículas de solo pela enxurrada (HECKLER & SALTON, 2002).

HECKLER & SALTON (2002) também fazem uma avaliação sobre o ponto de vista da fertilidade do solo, esclarecendo que a manutenção da palha sobre a

superfície ocorrerá um processo de acúmulo gradativo de material orgânico no solo com o transcorrer do tempo. A partir de determinado momento, quando a taxa de adição deste material orgânico superar a taxa de decomposição, a concentração de matéria orgânica tenderá a aumentar, resultando no aumento da fertilidade do solo. Como resultado da maior concentração de nutrientes nas camadas superficiais e do maior teor de matéria orgânica, haverá aumento na eficiência de uso dos nutrientes, o que em muitas situações possibilitará redução nas dosagens dos adubos. Para Malavolta (2006), a matéria orgânica do solo não é apenas uma fonte de nutrientes, mas tem grande importância de natureza coloidal como condicionador do solo, agregando partículas minerais e conferindo ao solo condições favoráveis de porosidade e friabilidade. Ela aumenta a retenção de água em solos e é responsável, em grande parte, pela capacidade de troca de cátions nos solos tropicais. Conforme Mendonza et al. (2000), com a manutenção da palhada na superfície ocorre aumento nos teores da fração húmica e da fração ácidos fúlvicos na matéria orgânica do solo e incremento da biomassa microbiana do solo.

Se, por um lado, a colheita de cana sem queima e a menor movimentação do solo nas soqueiras podem constituir práticas conservacionistas, por outro lado, o tráfego de colhedora e de veículo de transbordo pode ser fonte de compactação e desarranjo da estrutura do solo, com consequente aumento de resistência ao crescimento radicular e redução de condutividade hidráulica, e de microporosidade e aeração do solo (LEME FILHO, 2009).

De acordo com Vianna et al. (2015), a cobertura de palha oferece um isolamento físico à superfície do solo, evitando a interceptação da radiação solar pelo solo fazendo com que a temperatura do solo se mantenha mais estável e com menor gradiente entre camadas. Entretanto, um solo sem a cobertura da palha apresenta a temperatura mais elevada devido a maior interceptação de radiação solar pelo solo. E tal diferença afeta o perfilhamento da cana, que pode ser explicado pela temperatura do solo e/ou pela intercepção direta radiação de radiação solar.

O efeito físico da cobertura morta é muito importante na regulação da germinação e na taxa de sobrevivência das plântulas de algumas espécies de plantas daninhas. Os efeitos sobre o processo germinativo podem ser exemplificados com a redução da germinação de sementes fotoblásticas positivas, das sementes que requerem determinado comprimento de onda e das sementes

que necessitam de grande amplitude de variação térmica para inibir o processo germinativo (CORREIA & DURIGAN, 2004).

A dinâmica palha que é depositada sobre o solo não é plenamente conhecida, já que clima, quantidade de palha, teor de argila do solo, número de cortes, variedade de cultivo, práticas culturais, relação C/N e outros, alteram sua decomposição (TRIVELIN et al., 1995). Oliveira et al. (1999), constataram que, após um ano de permanência da palhada no campo, verificou-se redução de massa de aproximadamente 20%, originária, em sua maior parte, do conteúdo celular e da hemicelulose.

Entre os diferentes tipos de biomassas lignocelulósica, a palha de cana-de-açúcar se destaca como fonte energética. A palha apresenta grande potencial para geração de calor, eletricidade e produção de etanol celulósico. O aproveitamento da palha deverá ocupar um lugar de destaque como matéria-prima para a produção de etanol combustível (SANTOS et al., 2012). Conforme esses autores, a sua não utilização significa desperdício energético, pois de acordo com (RIPOLI & GAMERO, 2007) uma tonelada de palha equivale a algo entre 1,2 a 2,5 EBP (equivalentes barris de petróleo).

Atualmente, o etanol é produzido praticamente a partir de matérias-primas sacarinas ou amiláceas, cana-de-açúcar e milho, porém existe um grande esforço da comunidade científica para o desenvolvimento de novos processos economicamente viáveis para o aproveitamento da componente lignocelulósica da biomassa, como dos resíduos agroflorestais (FELIPE, 2010).

A demanda futura por etanol com alta eficiência e sustentabilidade projeta a necessidade de aumentar significativamente sua produção nos próximos anos. Esse aumento poderá ser alcançado pela introdução de novas cultivares de cana-deaçúcar e pelo aproveitamento integral da cana, a palha e o bagaço, para produção de etanol e outros combustíveis renováveis, ou mesmo por meio da biorrefinaria. O aproveitamento da palha de cana-de-açúcar pode contribuir significativamente para este aumento (SANTOS et al., 2012).

O emprego da palha como fonte de energia pode trazer vantagens econômicas por duas vias: pelo aumento do potencial de geração de energia elétrica, possibilitando a venda de maiores excedentes; e/ou pela redução da demanda por bagaço, viabilizando o emprego de variedades de cana com baixo teor de fibra e, consequentemente, níveis mais elevados de POL na cana (PC) e açúcar

total recuperável (ATR). Pode, também, contribuir para o aumento da produção de etanol pela hidrólise da celulose, tecnologia que tem sido amplamente pesquisada e aprimorada recentemente (LEMES FILHO, 2009). Ainda segundo este autor, para utilização da palha como fonte de energia, pode-se enleirar a palha no campo, e depois recolhê-lo com máquina recolhedora de forragem, ou empregar o sistema de colheita integral. Para a aplicação deste último, há necessidade de instalação, na usina, de equipamentos de pré-limpeza, que separam os rebolos de colmos e a palha.

A maior dificuldade para o uso da biomassa como fonte geradora de energia está no custo de coletar e transferir o resíduo do campo para o centro de processamento, por isso, deve-se realizar um balanço econômico do processo para verificar a viabilidade da utilização (FLORENTINO, et al. 2008). De acordo com Leme Filho (2009), nesse balanço, deve-se levar em conta, além do custo do transporte, a suscetibilidade do solo a erosão, o grau de infestação por plantas daninhas e a composição da comunidade infestante, bem como a sensibilidade da variedade à presença de palhada quanto à brotação e ao perfilhamento.

3.3. EVAPORAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A evaporação e os fenômenos de condensação na atmosfera e formação de nuvens e precipitação têm fascinado cientistas, filósofos e pessoas comuns desde tempos antigos. Evaporação é o fenômeno pelo qual uma substância passa do estado líquido para o estado gasoso e, no caso da água, pode acontecer a partir de uma superfície livre ou uma área de solo úmido, bem como das folhas de plantas e árvores (ARYA, 2001).

Para que ocorra o processo de evaporação da água do solo e o mesmo seja mantido ao longo do tempo, são necessárias três condições. Primeiro, a superfície deve ser suprida de energia continuamente e, em segundo lugar, deve haver uma diferença de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar. A terceira condição é que deve haver um suprimento contínuo de água no interior do solo à superfície, onde ocorre a evaporação. O suprimento de água para a evaporação é dependente das propriedades físicas do solo, principalmente, estrutura, densidade e porosidade. Estas, por sua vez, influenciam a dinâmica da água no solo e são

modificadas em sistema de plantio direto, através do não revolvimento e da manutenção da palha na superfície (DALMAGO, 2004).

Sobre uma superfície de solo descoberto, sem água parada, a umidade do solo é a única fonte de água para evaporação. Portanto, a taxa de evaporação depende da umidade do solo na camada superficial do solo. Quando a superfície do solo está completamente saturada e o teor de umidade do solo não é um fator limitante na evaporação, essa é a taxa máxima de evaporação para as condições meteorológicas de superfície e é chamada de evaporação potencial ou máxima. Quando o solo se torna mais seco, a taxa de evaporação para as condições atmosféricas referidas (em particular a temperatura da superfície, a velocidade do vento perto da superfície, a umidade específica e a estabilidade) é limitada, pois depende do conteúdo de água na camada superior do solo. Esta, por sua vez, depende da umidade que flui através do solo (ARYA, 2001). Van Keulen e Seligman (1987) utilizaram esse critério num modelo de estimativa da evaporação real, utilizando um fator de redução sobre a evaporação máxima do solo em função do conteúdo relativo de água no solo.

A evaporação da água na superfície do solo pode ser afetada por outros fatores externos, além daqueles citados anteriormente. Esses fatores atuam indiretamente, modificando as condições de demanda rente à superfície e as propriedades físicas do solo. Entre eles, os mais importantes são o método de preparo do solo, a presença de plantas crescendo sobre o mesmo e as práticas de manejo adotadas, principalmente, aquelas que modificam a superfície do solo (DALMAGO, 2004).

Quando se tem plantas crescendo sobre o solo, ocorre o sombreamento, que interfere na quantidade de energia que incide sobre o solo. Por isso, no início do ciclo da cultura quando o índice de área foliar (IAF) é pequeno, a evaporação tende a ser maior que quando o IAF é máximo (Bergamaschi et al., 2004). Práticas de manejo que modificam a superfície do solo, como a manutenção da palha sobre o solo, interferem por exemplo na temperatura do solo, na radiação incidente, na rugosidade da superfície e consequentemente na evaporação.

3.4. TRANSPIRAÇÃO

A perda de água por um vegetal pode ocorrer de duas formas: a gasosa (vapor de água) ou líquida. A via predominante de transpiração é a gasosa através dos estômatos, representando até 90% da perda de água total dos vegetais. Com relação à transpiração, todas as superfícies de um vegetal, em contato direto ou indireto com a atmosfera, estão sujeitas a perder maior ou menor quantidade de água por transpiração. Caules, flores, frutos, transpiram, mas a perda maior de água por transpiração se dá por meio das folhas. O grau de abertura dos estômatos é variável nas diferentes horas do dia e determina a variação da perda de água pelo vegetal ao longo do dia. A transpiração é um processo que ocorre, essencialmente, em duas fases, a evaporação da água para os espaços intercelulares e após, a difusão da água para a atmosfera. O estômato é a principal via e perda de água por transpiração, sendo o grau de abertura dependente do grau de saturação hídrica das células estomáticas, podendo haver restrição da transpiração quando há déficit de água na planta (VERTUAN, 2003).

Ao mesmo tempo em que as plantas necessitam abrir os estômatos para absorver CO₂ e, assim, realizar a fotossíntese, também necessitam fechá-los para evitar a perda de água. A solução encontrada foi à regulação temporal da abertura estomática. À noite quando não há fotossíntese, e, portanto, não há demanda por CO₂ dentro da folha e a abertura estomática fica pequena. Nas manhãs ensolaradas e com suprimento de água abundante e quando a radiação solar incidente na folha favorece altas taxas de fotossíntese, a demanda por CO₂ dentro da folha é alta e, por isso, o poro estomático permanece aberto (VERTUAN, 2003).

A transpiração pode ser considerada como um processo físico de difusão, de modo que a taxa de transpiração é proporcional à diferença entre a concentração de vapor d'água nas superfícies evaporantes e o conteúdo de vapor d'água da atmosfera (LARCHER, 2006). Desse modo, a água no contínuo solo-planta-atmosfera é transportada de acordo com um gradiente de potencial hídrico, sempre do maior para o menor potencial. A demanda evaporativa do ar provoca perda de água por meio da transpiração, tornando necessária a reposição contínua de água para manter um nível apropriado de hidratação dos tecidos (MARENCO, LOPES, 2005).

A transpiração pode ser influenciada pelos mesmos fatores da evaporação de água no solo mencionado anteriormente, e ainda, por fatores fisiológicos, como arquitetura da copa, resistência do dossel, espécie, cultivar e fase fenológica. Além disso, baixos níveis de fertilidade do solo e presença de horizontes que apresentem resistência à penetração das raízes podem limitar o desenvolvimento da copa e reduzir a evapotranspiração (GENTIL, 2010).

3.5. FLUXO DE SEIVA

O potencial da água na copa dos vegetais é controlado pelo balanço entre o processo transpiratório e o fluxo ascendente de água pelo xilema, das raízes para as folhas, como resultado do mecanismo, principalmente, da teoria conhecida como coesão-tensão de ascensão da seiva (TAIZ e ZEIGER, 2009). Os mesmos autores descrevem que este mecanismo é desencadeado pelo contato direto que as células do mesofilo na folha têm com a atmosfera pelos espaços intercelulares e, à medida que a água é perdida para a atmosfera, aumenta-se a tensão no sistema gerando assim o fluxo de seiva.

O fluxo de seiva é resultado da perda de água da cultura pelas folhas, ocasionando uma corrente transpiratória explicada pela teoria da adesão-coesão. Em plantas bem hidratadas, a variação do fluxo de seiva acompanha normalmente a demanda atmosférica em função da radiação solar, temperatura, vento e umidade do ar. No período noturno pode existir ainda um pequeno fluxo de seiva através do tronco, para suprir a deficiência hídrica da parte aérea da planta que ocorre devido à transpiração do período diurno; este fluxo tende ao mínimo ou nulo ao final da noite, estando o solo com boa disponibilidade hídrica (ANGELOCCI, 2002).

Dentre os métodos utilizados na determinação do fluxo de seiva, o método do balanço de energia apresenta grande potencial de uso em cana-de-açúcar. A fundamentação teórica para aplicação desse método foi descrita por SAKURATANI, (1985). Porém, foram Baker & Van Bavel (1987) que difundiram sua utilização por torná-lo mais simples e de menor custo. A principal modificação proposta por esses autores foi à aplicação de uma potência elétrica constante sobre a jaqueta de dissipação térmica do sensor, o que diminui as exigências eletrônicas para realização das medidas, tornando necessária apenas uma fonte de corrente contínua para alimentação dos sensores de fluxo (MARIN, 2003a).

O cálculo do fluxo de seiva se baseia no aquecimento de um segmento do colmo por uma fonte de calor (P), sendo que a energia térmica foi dissipada por condução nos eixos axial (Qi e Qs) e radial (Qr) e também por convecção através do fluxo de seiva (Qf), conforme Figura 1.

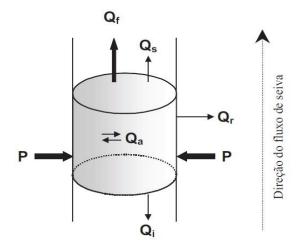


Figura 1. Representação esquemática do princípio de funcionamento do método do balanço de calor, em que P é o calor aplicado ao sensor; Qs e Qi são os fluxos axiais de calor para cima e para baixo do sensor respectivamente; Qr é o calor dissipado radialmente; Qa é o calor armazenado no segmento de caule amostrado e Qf é o calor conduzido pela seiva (MARIN et al., 2008).

Para a obtenção do fluxo de seiva (FS), é utilizada a Equação 1, conforme Sakuratani e Abe (1985):

$$FS = \frac{P - Qa - Qr}{dT.cp} \tag{1}$$

em que FS é o fluxo de seiva em kg s⁻¹; P é a potência aplicada (W); Qa é o fluxo em watts de energia dissipada axialmente; dados pela soma dos fluxos axiais superior (Qs) e inferior (Qi); Qr é o fluxo de energia dissipada radialmente; dT é a diferença de temperatura entre a extremidade superior e inferior do sensor e cp é o calor específico da água $(4,186\ 10^{-3}\ J\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1})$.

Os fluxos axiais (Qa) são calculados conforme Equação 2:

Qa=Kst . Ac .
$$\frac{(\Delta Tb - \Delta Ta)}{\Delta r}$$
 (2)

em que Kst é a condutividade térmica do colmo, considerada 0,54 W m⁻¹ °C⁻¹ (SAKURATANI E ABE, 1985), Ac é a área da seção transversal do colmo e Δx é a distância entre os termopares, para o sensor Dynamax utilizado em cana (3 mm).

Qr é calculado conforme Equação 3:

$$Qr = Kr * \Delta Trad \tag{3}$$

em que Kr é a condutividade térmica do fluxímetro de calor radial e pode ser obtida em condições de fluxo de seiva nulo ou desprezível para cada instalação do sensor, conforme Equação 4 (RIGHI, 2004):

$$Kr = \frac{(Pi-Qa)}{\Delta Trad}$$
 (4)

A determinação de Kr geralmente é realizada com dados coletados entre as 3 e 5 horas da madrugada, horário considerado com fluxo de seiva zero ou próximo de nulo.

O método de balanço de calor destaca-se perante as outras técnicas por ser um método absoluto e não invasivo que dispensa procedimentos de calibração e exige equipamentos relativamente simples, sendo a construção de sensores relativamente fácil e de baixo custo. Embora de fácil manuseio e instalação, há necessidade de avaliação da qualidade das medidas para a obtenção de dados precisos, sendo essa prática difícil de ser feita, principalmente em condições de campo e em plantas de grande porte. Avaliações representativas e corretas de transpiração em plantas utilizando-se medidas de fluxo de seiva pelo método de balanço de calor devem considerar vários aspectos práticos e metodológicos relacionados à instalação dos sensores, avaliação de seu funcionamento, coleta de dados e avaliação dos resultados. Ainda, devem ser conhecidos e compreendidos os aspectos teóricos empregados no método, assim como suas suposições, para que seja possível avaliar possíveis desvios em relação à teoria de funcionamento ou mesmo verificar situações em que são tomadas medidas irreais do fluxo de seiva (MARIN et al., 2008).

Para uso do método do balanço de calor em cana-de-açúcar, faz-se normalmente a instalação dos sensores na região dos entrenós, a fim de evitar a brotação das gemas do colmo. É importante selecionar entrenós mais cilíndricos e

com diâmetros que garanta o perfeito contato do sensor com o colmo. Além disso, deve-se retirar a palha que o envolve, lixar levemente a área onde ficará o sensor, de modo a remover a cera do colmo e em seguida espalhar uma pasta térmica ao redor do tecido do colmo, para favorecer a dissipação térmica. Em volta da pasta térmica, passa-se um filme plástico alimentício e em seguida, instala-se o sensor de fluxo de seiva. Para evitar interferências da incidência de radiação solar com aquecimento dos sensores, sugere-se o uso de uma camada adicional na área onde o sensor é instalado é revestida com papel alumínio e por cima, coloca-se mais uma camada de papel filme (NASSIF, 2015).

3.6. RESISTÊNCIA FOLIAR À DIFUSÃO DE VAPOR

Em sua trajetória da folha para a atmosfera, a água é puxada do xilema para as paredes celulares do mesofilo, de onde evapora para os espaços intercelulares da folha. O vapor de água sai, então, da folha através do poro estomático, os quais são normalmente mais abundantes na superfície abaxial da folha (Taiz & Zeiger, 2009). Na fase gasosa, a água move-se nesse trajeto predominantemente por difusão, de modo que o movimento de água é controlado pelo gradiente de concentração de vapor de água. A cutícula cerosa que cobre a superfície foliar é uma barreira bastante efetiva ao movimento de água, estimando-se que menos de 5% da água perdida pelas folhas saia pela cutícula.

De acordo com Marin (2003a), a rc possui três componentes, a saber: a resistência dos espaços intercelulares de ar, a da cutícula e a dos estômatos, associados em série conforme o esquema da (Figura 2).

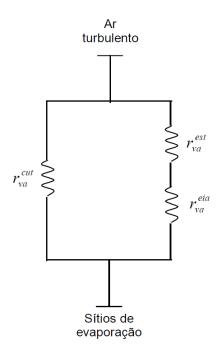


Figura 2. Esquema da associação das resistências à difusão de vapor na folha. r^{Est}_{va} é a resistência estomática à difusão de vapor; r^{eia}_{va} é a resistência dos espaços intercelulares de ar; r^{cut}_{va} é a resistência cuticular (MARIN 2003a).

Na determinação da resistência/condutância das folhas à difusão de vapor d'água, a técnica mais usada é a de porometria. Muitos tipos de porômetros foram desenvolvidos, como os porômetros independentes do vapor d'água e os de difusão de vapor. Estes últimos funcionam com medida e/ou determinação do próprio vapor d'água e utilizam uma câmara gasométrica especial. Atualmente, dois são os tipos mais usados. O primeiro é o porômetro de difusão dinâmica, que se baseia na passagem de um fluxo de ar seco, ou com baixa concentração de vapor, pela câmara que encerra a folha, sendo medido o tempo para que a umidade do ar aumente de um certo valor ("tempo de trânsito"), que depende da transpiração e, consequentemente, da resistência ou da condutância foliar à difusão de vapor, pois quanto menor a transpiração (maior resistência difusiva da folha), maior o tempo para que a umidade do ar sofra a variação entre os limites de valores estabelecidos. A resistência ou a condutância à difusão de vapor é determinada, então, por calibrações com o tempo de trânsito, o que depende, também, da própria umidade e da temperatura do ar (ANGELOCCI, 2002).

De acordo com esse autor, o segundo tipo é o porômetro de difusão de fluxo contínuo em equilíbrio dinâmico ("steady-state porometer"). Nesse tipo, um fluxo de ar seco é passado pelo interior da câmara, sendo variado automaticamente durante

a medida, de acordo com a transpiração, no sentido de manter minimamente variável as condições de umidade do ar dentro da câmara, condições essas que podem ser fixadas de acordo com o interesse do pesquisador, normalmente mantendo-a próxima da umidade do ar externo à câmara. O vapor transpirado é então misturado com esse ar seco que flui pela câmara e o fluxo de ar agora úmido é direcionado para fora da câmara, sendo que na saída desta faz-se a medida da nova concentração de vapor, sendo então o ar arrastado para o exterior. Com os dados de fluxo de ar seco que entra e da concentração de vapor no ar na saída da câmara, da temperatura da folha (para estimativa da concentração de vapor nos sítios de evaporação, que é saturante ou muito próxima dessa condição), é possível estimar a taxa de transpiração e o valor de rc sem necessidade de calibração.

Ambos os tipos de porômetro tem suas vantagens e desvantagens. O de difusão dinâmica é mais barato, tem menor complexidade de construção, mas exige calibrações que variam com a temperatura e a umidade do ar. O de fluxo contínuo não exige calibração, pois opera no princípio de "balanço de nulo" de vapor, ou seja, a concentração de vapor não aumenta na câmara durante a medida. Ele permite determinar a transpiração nas condições ambientais impostas pela câmara gasométrica, mas necessita periodicamente ter seus sensores aferidos, principalmente os de umidade do ar, de temperatura da folha e de fluxo de ar que passa pela folha, pois essas medidas são exigidas para que o aparelho calcule a transpiração e a resistência/condutância difusiva de forma absoluta (e não por calibração). Ambos os tipos possuem diferenças de construção da câmara gasométrica, que podem ser fontes de erro (ANGELOCCI, 2002).

Apesar do avanço significativo das técnicas de medida rc nas últimas três décadas, principalmente da porometria, sua determinação "in situ" ainda é complicada por uma série de fatores (variação temporal e variabilidade espacial de rc, problemas de alteração da abertura estomática na câmara porométrica etc.), ficando restrita à pesquisa científica (MARIN, 2003a). Conforme este autor, a resistência estomática também pode ser estimada, porém é mais complicada para ser calculada, devido às particularidades do caminho de fluxo do aparato estomático, constituído pelas células guarda, pela cavidade subestomática, pelas células subsidiárias e pelo poro estomático. Para fins de aplicação prática, é interessante tentar modelar a resposta estomática aos fatores do ambiente e à condição hídrica da planta, como uma forma de estimar rc. No entanto, a modelagem é dificultada

pelo entendimento parcial dos mecanismos de regulação estomática e de sua resposta aos fatores ambientais. Mesmo diante das dificuldades, vários autores vêm propondo modelos de estimar a condutância/resistência estomática das culturas, como JARVIS (1976), THORPE et al. (1980), (MARIN et al., 2001a) e HOUSHMANDFAR et al., (2015).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. ÁREA EXPERIMENTAL

O trabalho foi conduzido num canavial de 2ª soca com a cultivar RB867515, uma das mais importantes para o setor sucroalcooleiro brasileiro, ocupando aproximadamente 26% da área cultivada no país (Censo Varietal Ridesa, 2015). O plantio foi realizado em outubro de 2012, em linha simples com espaçamento de 1,40m entre linhas, distribuindo-se de 13 a 15 gemas por metro linear a 0,25m de profundidade e em uma área de 2,5 ha.

A área experimental pertence ao Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" e está localizada na Fazenda Areão, município de Piracicaba – SP, a 540 metros de altitude. O clima da região é caracterizado como Cwa, segundo a classificação de Koeppen e o solo classificado como CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb Eutrófico - CXbd (Embrapa, 2013), cuja caracterização química foi realizada no mês de dezembro de 2014 (Tabela 1), sendo que as amostras foram realizadas cerca de 20 cm das linha de plantio e nas profundidades de 0-20 e de 20-40 cm. A Figura 3 mostra parte da fazenda e, destacado na cor vermelha, a área experimental A e B a área de abrangência do pivô e a descrição do solo.

Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental.

| | | рН | Р | K | Ca | Mg | Al | H+AI | SB | CTC | V | M |
|-------|---------|------|-------------------|-----|------|------|--------|------------------|------|------|------|----------|
| | | CaCl | mgdm ⁻ | | | m | molc o | dm ⁻³ | | | % | <u> </u> |
| Com | 0-20cm | 5,6 | 18,3 | 4,5 | 41,3 | 19 | 1,3 | 32,3 | 64,8 | 97 | 66,5 | 2,3 |
| palha | 20-40cm | 4,9 | 5,8 | 3 | 26,3 | 11 | 5,4 | 39,5 | 40,2 | 79,7 | 51,3 | 12 |
| Sem | 0-20cm | 5,4 | 32,8 | 3,9 | 41 | 21 | <1 | 30,8 | 65,9 | 76,8 | 68 | 1,5 |
| palha | 20-40cm | 5,2 | 42 | 1,6 | 27,8 | 14,8 | 1,1 | 32,8 | 44,1 | 96,1 | 57,3 | 3 |

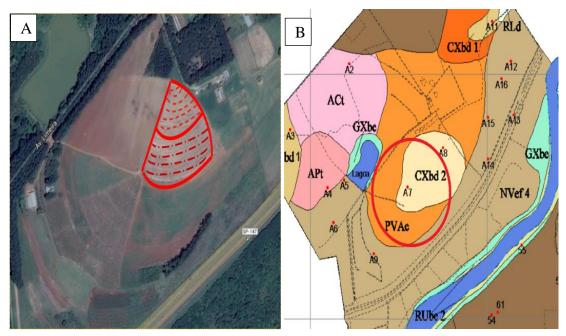


Figura 3. Área experimental, canavial delimitado na cor vermelha com hachuras (A) e tipo de solo do experimento e área de abrangência do pivô (B), localizada na fazenda Areão da ESALQ-USP, município de Piracicaba – SP.

A caracterização química das folhas também foi realizada em dezembro de 2014, de acordo com (MALAVOLTA et al., 1997) (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização química das folhas de cana-de-açúcar.

| | N | Р | K | Ca | Mg | S | В | Cu | Fe | Mn | Zn |
|----|-------|------|--------------------|------|------|------|------|------|--------|--------|-------|
| | | | g Kg ⁻¹ | | | | | | mg Kg | 1 | |
| СР | 14,44 | 1,28 | 8,67 | 4,92 | 1,67 | 2,32 | 2,76 | 5,67 | 107,83 | 110,50 | 14,67 |
| SP | 14,41 | 1,48 | 11,22 | 4,35 | 2,03 | 2,49 | 2,45 | 5,00 | 80,67 | 104,83 | 15,00 |

4.2. IRRIGAÇÃO

A área experimental foi submetida à irrigação por aspersão superficial, realizada por pivô central (Figura 4). O ano de 2014 foi um dos anos mais secos da série histórica de Piracicaba, com comprometimento da irrigação plena do canavial por falta de opções de captação de água tanto no Rio Piracicaba como no reservatório que usualmente abastece os sistemas de irrigação da Fazenda Areão da ESALQ. Apesar de aquém do necessário, a irrigação foi suficiente para assegurar níveis de evapotranspiração de cultura (ETc) durante a maior parte do experimento.



Figura 4. Sistema de irrigação por pivô central utilizado no experimento em dois estágios de desenvolvimento do canavial experimental da Fazenda Areão, município de Piracicaba – SP.

A irrigação foi controlada de acordo com os dados coletados pela sonda portátil de monitoramento de umidade do solo, denominada "Diviner 2000[®]", que utiliza sensores de capacitância, a partir da Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) (Sentek, 2000) para determinar o conteúdo de água no solo, possibilitando a estimativa da condição hídrica do canavial. Quando havia água disponível nos mananciais, o canavial foi irrigado sempre que o solo apresentava 60% da CAD, de modo a retornar para a capacidade de campo e com eficiência de irrigação de 85%.

4.3. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização do experimento a área foi dividida em dois tratamentos, (T1) CP e (T2) SP (Figura 5), sendo todas as medidas abaixo descritas, realizadas simultaneamente nos dois tratamentos, para posterior comparação estatística entre eles. Para cada tratamento foram delimitadas quatro parcelas (5 linhas x 5m), totalizando 8 parcelas de 25 metros lineares. Em cada parcela foram selecionados 5 indivíduos, que foram devidamente identificados e avaliados durante todo o ciclo (Nassif et al., 2013).

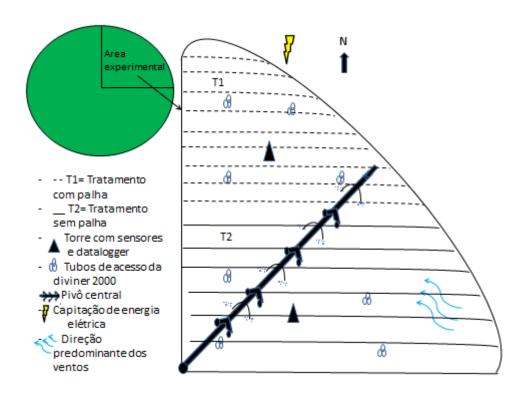


Figura 5. Representação esquemática da área experimental, com a localização do pivô central, das torres para avaliação da evapotranspiração em cada tratamento (T1) CP e (T2) SP, posicionamento dos tubos de acesso para a sonda Diviner 2000, direção predominante dos ventos e fonte de captação de energia elétrica para alimentação dos instrumentos instalados na área.

4.4. TRATOS CULTURAIS

Os tratos culturais, como adubação e aplicação de defensivos agrícolas, foram realizados no início do terceiro ciclo da cultura, conforme as práticas convencionais de cultivo da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo. Para remoção total da palhada do T2, foi utilizado um enleirador de palha e, posteriormente, as leiras foram removidas totalmente da área com auxílio de um escarificador (Figura 6 A e B). No T1, foi mantido 9 t ha-1 de palha.



Figura 6. Vista da parcela mantida com palha sobre o solo e tratos culturais com enleirador (A) e vista da parcela SP e tratos culturais pelo escarificador (B), utilizados no experimento, localizado na Fazenda Areão, município de Piracicaba – SP.

4.5. BIOMETRIA

As avaliações biométricas para determinação do perfilhamento, ocorreram quinzenalmente, desde a emergência até o início do estádio de crescimento dos colmos, onde se iniciou também as análises de número e comprimento do colmo e do índice de área foliar com o LAI 2000. A partir desse momento, as análises biométricas ocorreram mensalmente até o período de maturação e colheita.

As avaliações de umidade das folhas, colmos e palmitos, ocorreram concomitantemente à biometria, para isso foram coletados 10 indivíduos em sequência localizados ao lado de cada parcela possível (evitando-se assim interferir nas parcelas). Cada tratamento contou com quatro repetições, totalizando 8 amostras, para as quais foram determinadas a massa fresca e, após secagem em estufa de circulação forçada de ar à 65° C até atingir massa constante, a massa seca de folhas, colmos e palmitos. Após esse procedimento, determinou-se a biomassa da parte aérea (Equação 5).

Biomassa (kg ha⁻¹)=
$$\frac{10.000}{1,4}$$
. $\frac{\text{n. médio de colmo em 25m}}{25}$. $\frac{\text{peso médio das amostras}}{10}$ (5)

A última amostragem ocorreu no final do ciclo, antes da cana ser colhida e foram avaliados para cada parcela a biometria e a umidade. Por último, toda a parcela foi colhida e pesada, possibilitando estimar a produtividade final de cada tratamento com menor nível de incerteza (Figura 7). As análises tecnológicas foram realizadas mensalmente a partir do mês de março de 2015, quando se iniciou o acúmulo de sacarose no colmo.



Figura 7. Colheita do canavial manejado CP e SP, Piracicaba-SP.

4.6. TEOR DE CLOROFILA

Com a finalidade de checar o bom estado nutricional e fisiológico do canavial e possíveis efeitos da manutenção da palhada sobre o teor proteico da folha, fez-se o monitoramento do teor de clorofila durante 5 meses com auxílio de um medidor de clorofila, clorofilog portátil FALKER[®] CFL 1030, sendo que foi realizado uma amostragem ao mês em 7 plantas aleatórias de cada tratamento e cada leitura realizada sempre na folha +1 (Rossetto, 2016) (Figura 8).

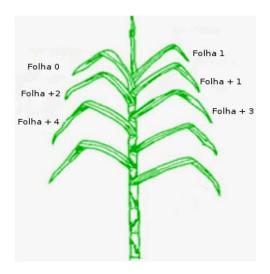


Figura 8. Esquema de numeração de folhas pelo sistema de Kuijper, adaptado pelo por Rossetto, (2016).

4.7. FLUXO DE SEIVA (FS)

A determinação da transpiração pelo FS foi feita pelo método do balanço de calor, com sensores comerciais Dynamax Inc. (Houston, Texas, EUA), que seguem o modelo proposto por Baker & Van Bavel (1987). Como constituição básica, esses sensores possuem uma jaqueta térmica para dissipação de calor, de um fluxímetro de termopilha para quantificação do fluxo radial e de junções de termopar de cobreconstatam convenientemente dispostas para medir o fluxo de calor axial por condução no colmo (MARIN et al., 2008).

Foram utilizados 3 sensores Dynamax em cada tratamento, instalados nos colmos da cana-de-açúcar, na região dos entrenós, afim de evitar a brotação das gemas do colmo e em colmos com diâmetro acima de 3cm, de modo a garantir a correta fixação dos sensores. Além disso, os sensores foram envolvidos com um papel alumínio, de modo a evitar um aquecimento devido à radiação solar, e um papel filme, para evitar o molhamento devido à chuva ou irrigação (Figura 9A e B). As leituras foram realizadas a cada 15 segundos e a cada 15 minutos uma média da leitura dos sensores foi armazenada em um sistema automático de aquisição de dados Campbell Scientific, Inc.. As medidas foram realizadas durante 47 dias entre o final do crescimento da cultura e época de maturação da mesma. O fluxo de seiva da cultura também foi analisado durante 5 períodos de 9 dias cada um.

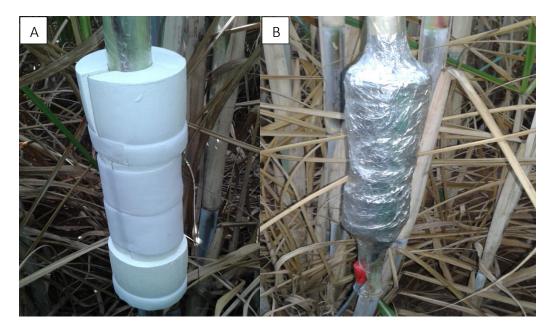


Figura 9. Sensores de fluxo de seiva instalados no canavial, antes de ser envolvido com papel alumínio e filme (A) e depois de ser envolvido (B).

Sempre que se trocavam os sensores de colmos se determinava o diâmetro dos colmos e a área foliar verde daquela cana. O diâmetro foi determinado com auxílio de um paquímetro e a área foliar verde pelo método de Huerta (1962), tendose como auxilio um retângulo de papel com área conhecida (3 cm de altura por 10 de comprimento, totalizando 30 cm²), o qual foi utilizado como base para remover 5 retângulos em cinco posições da folha diferente, ou seja, no início, entre o início e o meio, no meio, entre o meio e o fim e no final da folha verde da cana. Após a retirada dos retângulos foi efetuado a pesagem e de posse do peso total dos 5 retângulos e da massa fresca total das folhas verdes daquela cana, realizou-se uma relação entre a massa fresca total e a massa dos retângulos (com área conhecida), obtendo assim a área foliar verde em cm² (Equação 6).

$$AFV = \frac{(MFF \cdot (30 \cdot 5))}{MFR}$$
 (6)

em que MFF é a Massa fresca de folhas (g); MFR é a massa fresca de parte das folhas, retângulo, (g); AFV é a área foliar verde (cm²). Os valores 30 e 5 referem-se à área do gabarito (30 cm²) e ao número de repetições.

Segundo Marin et al. (2008), quando ocorre baixo FS, a diferença de temperatura nos sensores se aproxima de zero, o que pode levar a uma leitura de transpiração excessivamente alta. Devido a esta limitação do método, foi feito um filtro de baixo FS, que leva em consideração a variação de temperatura (ΔT), calor conduzido pela seiva (Qf) e o calor aplicado ao sensor (P), descrito a seguir (VAN BAVEL, 1999):

Se 0 <= Qf < 20% de P

e $\Delta T < \Delta Tm$ ínimo (0,75°C), então faça FS = 0

Uma segunda parte do filtro utilizado é:

Se Qf < 0, então faça FS = $0,00001g s^{-1}$ ou $0,036 g h^{-1}$

Foram estimadas a transpiração por colmo (L colmo⁻¹ dia⁻¹), integrando-se o resultado do FS para todo dia. Posteriormente, com a área foliar de cada colmo, foi feita estimativa da perda de água por metro quadrado de folha por dia e, multiplicando-se este último valor pelo IAF da área em questão, foi encontrado o consumo de água pela cultura em mm. A área média de folhas de cada colmo foi de 0,307 m² planta⁻¹ para a área SP e de 0,314 para a área CP.

4.8. SALDO DE RADIAÇÃO NO DOSSEL

Para determinação do saldo de radiação efetivamente absorvida pela canade-açúcar (Rn), foi utilizada a metodologia de Daamen et al. (1999), como mostra a (Equação 7):

$$Rn_{ef} = \frac{[Rn_{ac.}(1-e^{-k.IAF})]}{IAF}$$
(7)

em que Rn_{ef} é o saldo de radiação efetivamente absorvido pelo dossel (W m⁻² folha); Rn_{ac} é o saldo de radiação acima do dossel (W m⁻²), o qual pode ser medido ou mesmo estimado a partir da radiação solar global; k é o coeficiente de extinção por unidade de índice de área foliar (adimensional); IAF é o índice de área foliar.

O cálculo do coeficiente de extinção (k) foi feito pela abordagem proposta por Campbell (1986), que parte da estimativa da razão entre o eixo vertical e horizontal da arquitetura da copa (x); sendo AMI o ângulo médio de inserção das folhas (Equação 8):

$$x = -1,7433025 + \frac{162,22848}{AMI}$$
 (8)

O valor do k, por sua vez, foi estimado com a equação 9, pela abordagem proposta por Campbell & Norman (1998), como função de x e do ângulo zenital do Sol (z) (Equação 10).

$$K = \frac{\sqrt{x^2 + (\tan z)^2}}{x + 1,774.(x + 1,182)^{-0,733}}$$
(9)

O ângulo zenital do sol e dado por:

$$z = \arccos .(sen \delta. sen \Phi + cos \delta .cos \Phi .cos H)$$
 (10)

em que δ é a declinação do Sol, Φ é a latitude do lugar e H é o ângulo horário.

A declinação solar foi calculada, por meio da (Equação 11).

$$\delta$$
=23,45.sen[$\frac{360.(NDA-80)}{365}$] (11)

Em que NDA, é o número do dia do ano.

O ângulo horário é formado pelo meridiano do sol e o plano meridiano do local do experimento e foi calculado por meio da (Equação 12).

$$H= (hora local - 12) . 15^{0} h^{-1}$$
 (12)

4.9. RESISTÊNCIA AERODINÂMICA

A resistência aerodinâmica (ra) foi determinado, conforme Thon & Oliver (1977) que consideram em sua proposição o efeito da estabilidade no transporte das propriedades atmosféricas (Equação 13).

$$ra = \frac{4,72}{1 + 0,54.u} \cdot [ln(\frac{z}{z_0})]^2$$
 (13)

em que ra é a resistência aerodinâmica dada em s m⁻¹; u é a velocidade do vento (m s⁻¹); z é a altura de medida de u (m) e z₀ é o comprimento da rugosidade da superfície (m) (Equação 14) (Stanhill, 1969).

$$Z_0 = \frac{h^{0,997}}{7,638} \tag{14}$$

em que h é a altura média da vegetação (m).

4.10. RESISTÊNCIA DE COBERTURA

Dentre os itens até aqui abordados, julga-se que esse é o que apresenta as maiores dificuldades para sua investigação. Tanto a medida quanto sua modelagem são complicados devido às características inerentes ao processo biofísico da regulação estomática, além da altíssima variabilidade espacial da resistência de cobertura numa mesma árvore (Angelocci et al., 1998). Diante disso, e calçado nas oportunas ponderações feitas por Alves & Pereira (2000) a respeito da abordagem mais adequada para rc, propõe-se estudar uma forma alternativa para a estimativa de rc.

Essa proposição baseia-se no enfoque utilizado por Monteith (1965) na descrição do modelo da grande folha ("big-leaf model") e que assume que a cobertura vegetal atua como se fosse uma única grande folha, com um saldo de radiação efetivo (Rn_{ef}) e com determinada resistência à difusão de vapor (rc), tendo sido testada em café e citros com bom desempenho (Marin et al., 2001a; Marin et

al., 2003a), pode-se então descrever o balanço de energia dessa cobertura com a (Equação 15):

$$Rn_{ef} = H + LE$$
 (15)

em que Rn_{ef} é o saldo de radiação efetivo da cobertura vegetal, (W.m⁻² de folha), equação 4; H é a densidade de fluxo de calor sensível entre a cobertura e a atmosfera (W.m⁻² de folha); dado pela (Equação 16):

$$H = \frac{\rho.cp.(T_f - T_{ar})}{ra}$$
 (16)

em que T_f temperatura da "grande folha" (°C); Tar a temperatura do ar (°C); e ra a resistência da camada limite da folha à difusão de vapor ou somente resistência aerodinâmica (s.m⁻¹); LE é a densidade de fluxo de calor latente proveniente da copa (W.m⁻² de folha), dado pela (Equação 17):

$$LE = \frac{\rho.cp.(e_f - e_{ar})}{\gamma.(rc + ra)}$$
 (17)

em que e_f é a pressão atual de vapor da cavidade estomática (kPa), considerada igual a pressão de saturação de vapor à temperatura da folha, devido ao valor de umidade relativa no interior da folha ser muito próximo de 100%; e_{ar} é a pressão atual de vapor do ar (kPa); γ é a constante psicrométrica (0,062 kPa $^{\circ}$ C⁻¹); rc é a resistência à difusão de vapor da "grande folha" ou simplesmente a resistência da cobertura (s m⁻¹).

Substituindo-se as equações 16 e 17 na equação 18, tem-se:

$$Rn_{ef} = \frac{\rho.cp.(T_f - T_{ar})}{ra} + \frac{\rho.cp.(e_f - e_{ar})}{v.(rc + ra)}$$
(18)

Admitindo-se que a temperatura média da cobertura vegetal seja igual à do ar, a equação 18 resume-se a equação 19, de modo que, evidenciando-se rc, obtémse a (Equação 20):

$$Rn_{ef} = \frac{\rho.cp.(e_f - e_{ar})}{\gamma.(rc + ra)}$$
 (19)

$$rc = \frac{\rho.cp.(e_f - e_{ar})}{\gamma.Rn_{ef}} - ra$$
 (20)

A equação 20, portanto, fornece uma estimativa de rc, a partir de variáveis meteorológicas com medida de fácil realização e da resistência aerodinâmica.

No período noturno, considerou-se a rc igual a 2500 s m⁻¹, conforme Nobel (1999), de modo a simular o fechamento estomático noturno. Além disso, no início da manhã de alguns dias, quando a umidade relativa do ar estava próxima a 100%, verificou-se a ocorrência de valores de rc<0, indicando a presença de água livre sobre as folhas e permitindo inferir que apenas a resistência aerodinâmica controlava o processo de evapotranspiração. Dessa forma, nos momentos em que a equação 20 fornecia valores de rc<0 e Rn>0, considerou-se a rc= 0 s m⁻¹.

Para efeito de desenvolvimento e avaliação dessa abordagem, a temperatura foliar foi medida em três plantas de cada tratamento, com o auxílio de três termopares em cada planta, para eventual ajuste na Equação 20. A limitação quanto ao número de plantas deve-se a limitação no número de canais disponíveis para monitoramento dos termopares. Esta medida foi feita pela justaposição de um termopar fino, fixado na parte inferior da folha com auxílio de fita adesiva Micropore® da 3M, em folhas das três plantas, na porção intermediaria do limbo foliar, sendo cada termopar conectado em um sistema automático de aquisição Campbell Sci, Inc (Figura 10). Além da temperatura foliar, todas as variáveis meteorológicas necessárias para determinação de rc foram medidas a cada 1 segundo com médias a cada 15 minutos, sendo esta também a frequência de medida e armazenamento dos dados de velocidade do vento e fluxo de seiva. Como forma de avaliar o desempenho da equação 21, desenvolveu-se um algoritmo para estimativa da

temperatura foliar com base na resolução numérica da equação 21 por um método iterativo programado em VBA numa planilha Microsoft Excel™.

$$Rn_{ef} - \frac{\rho.\text{cp.}(e_f - ea)}{\gamma. \text{ (rc+ra)}} - \frac{\rho.\text{cp.}(\text{Tf - Ta})}{\text{ra}} = 0$$
 (21)

em que Rn_{ef} é o saldo de radiação efetivo da cobertura vegetal, (W.m⁻² de folha); T_f temperatura da "grande folha" (°C); Tar a temperatura do ar (°C); γ é a constante psicrométrica (0,062 kPa °C⁻¹); rc é a resistência à difusão de vapor da "grande folha" (s m⁻¹); e_f é a pressão atual de vapor da cavidade estomática (kPa), considerada igual a pressão de saturação de vapor à temperatura da folha, devido ao valor de umidade relativa no interior da folha ser muito próximo de 100%; e_a é a pressão atual de vapor do ar (kPa); ra a resistência da camada limite da folha à difusão de vapor ou somente resistência aerodinâmica (s.m⁻¹); ρ é a densidade do ar (kg m⁻³); cp é o calor específico do ar (kJ kg⁻¹ k⁻¹).



Figura 10. Termopar instalado sob a folha para determinação da temperatura foliar.

4.11. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

A equação de Penman-Monteith parametrizada para estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) (Allen et al., 1998) utilizada foi:

$$ETo = \frac{s \cdot (Rn + G)}{(s + \gamma) \lambda} + \frac{900 \cdot \rho \cdot cp \cdot \Delta e}{\lambda \cdot ra \cdot (s + \gamma)}$$
(22)

em que ETo é a evapotranspiração de referência (mm 15min^{-1}); Rn é o saldo de radiação (MJ m⁻² 15min^{-1}); G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² 15min^{-1}), considerado como negativo durante o período diurno; ρ é a densidade do ar (kg m⁻³); cp é o calor específico do ar (J kg⁻¹ k⁻¹); γ é a coeficiente psicrométrico (0,062 kPa $^{\circ}$ C⁻¹), λ é o calor latente de vaporização da água (MJ kg⁻¹) e Δ e é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa), dado por:

$$\Delta e = e_s - e_a \tag{23}$$

sendo e_a a pressão atual de vapor do ar (kPa) e e_s a pressão de vapor de saturação (kPa), determinadas a cada 15 minutos com as equações (24) e (25):

$$e_a = \frac{e_s. UR}{100} \tag{24}$$

$$e_s = 0.6110^{\frac{(7.5 T)}{(237.3+T)}}$$
 (25)

s é a declividade da curva de pressão de vapor, determinada pela seguinte expressão:

$$s = \frac{4098. e_s}{(T + 237,3)^2} \tag{26}$$

sendo T a temperatura do ar, (°C).

A resistência aerodinâmica foi estimada a partir da (Equação 27), estimandose os parâmetros de deslocamento do plano zero (d), comprimento da rugosidade

(z_o) a partir de dados da literatura como proposto por SZEICS et al. (1969), STANHILL (1969) e JONES (1992).

$$ra = \left\{ \frac{\left[\frac{\ln (z - d)}{z_0} \right]^2}{k u_z} \right\}$$
 (27)

em que ra é a resistência aerodinâmica dada em s m $^{-1}$; k é a constante de Von Karman (igual a 0,41); u $_z$ é a velocidade do vento (m s $^{-1}$); z é a altura de medida de u (m); d é o deslocamento do plano zero (m) de acordo com Rosenberg et al. (1983) Eq. (28) e z $_0$ é o comprimento da rugosidade da superfície (m) (Equação 29) (STANHILL, 1969).

$$Z0 = \frac{h^{0,997}}{7,638} \tag{28}$$

$$d = \frac{h^{0.979}}{1,425} \tag{29}$$

em que h é a altura média da vegetação (m).

4.12. MODELO DE PENMAN-MONTEITH

A estimativa da transpiração do canavial foi feita empregando-se o modelo de Penman-Monteith (Monteith, 1965) adaptado para folhas hipoestomáticas (equação 30) para intervalo de tempo de 15 minutos. Os dados estimados pelo modelo foram integrados para períodos de 24 horas, considerando-se os valores de Rnef iguais a zero durante o período noturno, obtendo-se assim a transpiração das plantas pelo termo aerodinâmico da equação. A título de comparação, o modelo também foi utilizado somente para dados do período diurno, considerando-se nula a transpiração no período noturno.

$$\lambda T = Af. \frac{\text{s. Rnef} + \rho. cp. \frac{(\Delta e)}{ra}}{\text{s} + \gamma. (1 + \frac{rc}{ra})}$$
(30)

em que T é a transpiração máxima da cultura da cana (mm 15min⁻¹); Rnef é o saldo de radiação efetivo da copa (MJ m⁻² de folha 15min⁻¹) (eq.15); ra é a resistência aerodinâmica à difusão de vapor (s m⁻¹) (eq.27); rc é a resistência da cobertura à difusão de vapor (s m⁻¹) (eq.20); Af é a área foliar do canavial (m²), ρ é a densidade de ar (kg m⁻³); cp é o calor específico do ar seco (J kg⁻¹ K⁻¹); γ é o coeficiente psicrométrico (0,062 kPa °C⁻¹); λ é o calor latente de vaporização da água (MJ kg⁻¹); Δe é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa) (eq. 23).

4.13. RESISTÊNCIA FOLIAR A DIFUSÃO DE VAPOR

Mediu-se no período entre novembro de 2014 até abril de 2015, uma vez ao mês, a resistência foliar com porômetro de equilíbrio dinâmico (modelo Delta T, AP4), devidamente aferido (Figura 11). Em cada dia que foi realizado a medição, foram realizadas 5 sequências de medida, com intervalos médios de 2 horas entre uma leitura e outra, amostrando-se 7 folhas de cada tratamento, sempre nas mesmas plantas, posição e na folha +1. Cada sequência de leitura não demorou mais que 15 minutos. De posse desses dados e com as medidas micrometeorológicas concomitantes, foram feitas as curvas diárias de variação dos valores médios medidos e das estimativas obtidas com a equação 20. Tais relações foram baseadas em dados de temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar, medidos dentro da área experimental.



Figura 11. Determinação da resistência estomática com porômetro de equilíbrio dinâmico modelo Delta T, AP4.

4.14. MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN

Em ambos os tratamentos foi instalada uma torre com dois psicrômetros de ventilação forçada (MARIN et al., 2001b), com diferença de altura de 1 m entre eles, sendo que ambos estavam localizados dentro da camada limite ajustada do canavial, acompanhando o crescimento da planta (ALLEN et al., 2011). Os cadarços de algodão, utilizados nos termopares de bulbo úmido, foram trocados a cada 10 dias no período mais chuvoso (fevereiro a abril) e a cada 5 dias no período mais seco (maio e junho). Os reservatórios de água dos psicrômetros foram limpos e reabastecidos com água destilada a cada 2 dias. Foi instalado um saldo radiômetro a 3 m acima do dossel do canavial e dois sensores de medida de fluxo de calor no solo, localizados na linha e entrelinha do canavial, enterrados a 2 cm de profundidade. Os dados foram coletados por um sistema automático de aquisição de dados, marca Campbell Scientific, Inc. (LOGAN, UTAH, EUA), modelo CR3000. As medidas foram realizadas entre os dias 1º de agosto de 2014 e 6 de maio de 2015. Uma bordadura de 110 metros foi respeitada entre o início do canavial e as torres de medidas, com a finalidade de obter-se bordadura adequada. Quando os ventos fossem originários de quadrantes onde não ocorresse uma bordadura suficiente, os dados foram descartados.

Com as medidas do saldo de radiação acima da cultura (Rn), fluxo de calor no solo (G), das diferenças de temperatura (ΔT) e da pressão de vapor (Δe) entre os dois níveis, foi determinado o balanço de energia (equação 20) e a evapotranspiração da cultura.

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \rightarrow ETC = \frac{Rn - G}{\lambda \cdot (1 + \beta)}$$
(31)

em que Rn é a saldo de radiação(MJ m $^{-2}$ d $^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo (MJ m $^{-2}$ d $^{-1}$), β é a razão de Bowen, LE é o fluxo de calor latente de evaporação (MJ m $^{-2}$ d $^{-1}$) e λ é o calor latente de evaporação calculada por: λ (MJ Kg $^{-1}$) = 2,503-0,002386*T($^{\circ}$ C).

Os valores da razão de Bowen (β), foram calculados através da equação 32 para cada intervalo de 15 minutos, com base nos valores de gradientes de temperatura (Δ T) (MARIN et al., 2005).

$$\beta = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e} \tag{32}$$

em que γ é o coeficiente psicrométrico, ΔT é a diferença temperatura do bulbo seco, em °C; Δe é o gradiente vertical de pressão de vapor do ar.

Conforme Righi (2004), o MRB pode apresentar incoerência em seus valores. Os dados foram avaliados conforme metodologia desenvolvida por Perez et al. (1999) em que os autores descrevem as condições para que os dados coletados apresentem consistência física, evitando assim erros de estimativas causadas por problemas de advecção ou do equipamento (Tabela 3).

Tabela 3. Condicionais para a avaliação dos dados para o método da razão de Bowen (adaptado de PEREZ et al., 1999)

| Energia | Diferença de | Razão de | Fluxos de calor |
|------------|------------------|----------|---------------------------------------|
| disponível | pressão de vapor | Bowen | |
| Rn - G > 0 | Δe > 0 | β > -1 | λE>0 e H≤0 para 1≤β≤0 ou H>0 para β>0 |
| | ∆e < 0 | β < -1 | λE<0 e H>0 |
| Rn - G < 0 | Δe > 0 | β < -1 | λE>0 e H<0 |
| | Δe < 0 | β > -1 | λE<0 e H≥0 para 1≤β≤0 ou H<0 para β>0 |

Nos períodos em que os resultados apresentaram tal incoerência, interpolouse a partir dos valores anterior e posterior, desde que não ocorridos em períodos contínuos superiores a 2 horas de dados incoerentes. Nos casos em que intervalos maiores que 2 horas não apresentaram dados consistentes, todo o conjunto de dados do referido dia foi descartado. Os dados foram integrados somente no período diurno, por objetivar-se a escala diária de resultados.

Baseado nos dados de Nassif (2014), uma análise da resolução do equipamento foi realizada com base na metodologia adotada por RIGHI (2004). Neste procedimento, os dois conjuntos de psicrômetros (seco e úmido) foram deixados em uma sala, nas mesmas condições de temperatura e umidade por 7 dias consecutivos, avaliando-se os dados de temperatura do bulbo seco, temperatura de

bulbo úmido e pressão de vapor. Comparando-se os dois conjuntos, assumiu-se que a resolução do equipamento como sendo a diferença entre os valores de temperatura registrada pelos psicrômetros. Assim, as diferenças de temperatura ocorridas no campo experimental, com valores igual ou superior ao desvio padrão, foram assumidas como erro de medida, desconsiderando-se tais períodos de medida nos cálculos da evapotranspiração.

4.15. MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO

Para monitorar o conteúdo de água no perfil do solo, foram realizadas medições pontuais da umidade do solo, utilizando-se uma sonda de capacitância, do modelo "Diviner 2000[®]", Sentek Pty Ltda, Austrália, (2000). As instalações dos tubos de acesso para sonda foram realizadas assim que o canavial foi colhido em 2013. Foram instalados 24 tubos de acesso, 12 tubos em cada tratamento, em quatro locais distintos, com três repetições em cada local (Figura 12).

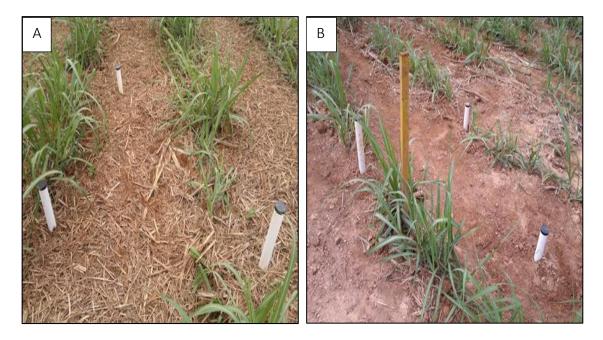


Figura 12. Tubos de acesso da sonda Diviner 2000, no tratamento CP (A) e SP (B).

A sonda de monitoramento da umidade do solo Diviner 2000 é portátil e consiste de um coletor de dados (datalogger) com monitor, acoplado ao elemento sensor que, ao ser inserido em um tubo de acesso instalado no solo, provê leituras do conteúdo de água em intervalos regulares de 0,1 m (SENTEK, 2001) (Figura

13a). Os tubos de acesso possuíam o comprimento de 1,6 m cada. Para a correta utilização deste tipo de monitoramento da água no solo os sensores foram normalizados e calibrados para as condições locais de solo do experimento. O método baseia-se no princípio da Reflectrometria no Domínio da Frequência (FDR), sendo o sinal obtido convertido em umidade volumétrica do solo (θ) através de uma equação de calibração previamente ajustada. Os procedimentos para obtenção da curva de calibração foram realizados seguindo instruções do próprio fabricante do equipamento (Sentek, 2000). Inicialmente foram efetuadas coletas de amostras de solo indeformadas para a determinação da umidade volumétrica (θ) pelo método gravimétrico (GARDNER, 1986). Em seguida, os valores específicos para o local do experimento, constantes A, B e C, foram inseridos no sistema de controle do equipamento. A normalização foi realizada colocando-se o sensor, envolvido pelo tubo de PVC, em contato com o ar e a água, para que os sensores possam reconhecer, independentemente, os diferentes meios aos quais foram submetidos (Figura 13b).

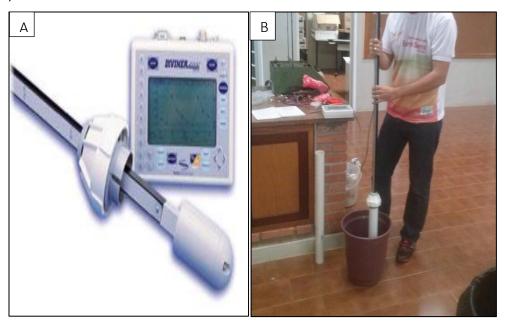


Figura 13. Sonda de monitoramento da umidade Diviner 2000 (A) e calibração da sonda em laboratório (B).

Como utilizado por Franco (2009), a escala de frequência (SF) ou frequência relativa, para cada ponto de observação, foi calculada pela equação 33:

$$SF = \frac{(Fa - Fs)}{(Fa - Fw)} \tag{33}$$

em que: Fa corresponde à leitura de frequência no tubo de acesso totalmente suspenso no ar; Fs a leitura de frequência no tubo de acesso instalado no solo; e Fw a leitura de frequência no tubo de acesso em contato direto com água, sendo todas as leituras em Hertz (Hz).

A partir do cálculo de frequência relativa (SF) e de posse dos valores de umidade volumétrica (θ) obtidos previamente pelo método gravimétrico, foi determinado um gráfico relacionando os pares de valores, sendo que no eixo das ordenadas foram plotados os valores de SF e no eixo das abscissas, os valores de umidade (θ). Calculou-se então a equação de regressão correspondente a cada amostragem, assim como os coeficientes A, B e C. Os resultados foram inseridos na programação da sonda.

4.16. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA CONFORME O BALANÇO HÍDRICO DO SOLO

De posse dos dados do conteúdo de água no solo, foi calculado a evapotranspiração real da cultura, conforme (LIBARDI, 1995) (Equação 34).

$$P + I \pm D/A \pm \Delta h \pm R - ETc = 0$$
 (34)

em que: ETc é a evapotranspiração da cultura (mm d⁻¹); P é a precipitação pluvial; I é a irrigação (mm d⁻¹); Δh é a variação no armazenamento de água no perfil do solo; R - escoamento superficial e D/A é a drenagem profunda ou ascensão capilar

No caso deste trabalho, o escoamento superficial foi considerado nulo, visto que considerou a topografia do terreno plana, P foi medida com pluviômetro, I através do controle de irrigação e Δh com base no perfil de umidade do solo, adotouse a variação de umidade do solo até a profundidade de 90 cm, pois a maior proporção de raízes ativas é encontrada até essa profundidade (REICHARDT e TIMM, 2004; OTTO et al., 2009). Essa informação foi comprovada no presente experimento pela abertura de trincheiras (Figura 14 a). A Equação 34 baseia-se no princípio de conservação de massa através da qual, quando aplicada para um

período de tempo específico, é possível determinar-se as componentes do ciclo hidrológico no sistema solo-planta (Singh & Chauhan 1996). Neste experimento, coletaram-se amostras não deformadas de solo, nas profundidades de 0,05; 0,15; 0,30; 0,60 e 1 m (Figura 14b), para a determinação da curva de retenção de água no solo no Laboratório de Física de Solos do CENA/USP, pelo método da câmara de Richards, nas pressões de 10; 20; 60; 100; 330; 1000; 3000; 15000 KPa. A extração da umidade das amostras de solo, em estufa à temperatura de 105 ° C, e a determinação da densidade aparente do solo, também foram realizadas no laboratório. No interior de cada tratamento foi aberta duas trincheiras com 1,5 m de profundidade, 1,5 m de largura e 2,0 m de comprimento, para extração de amostras indeformadas de solo, com três repetições em cada profundidade. Essas amostras foram utilizadas para determinação da condutividade hidráulica saturada, com permeâmetro de carga constante, no mesmo laboratório. O fluxo descendente (D) ou ascendente (A) cruzando o limite inferior do volume de solo foi considerado nulo, devido ser muito lento a partir dos 90 cm de profundidade.

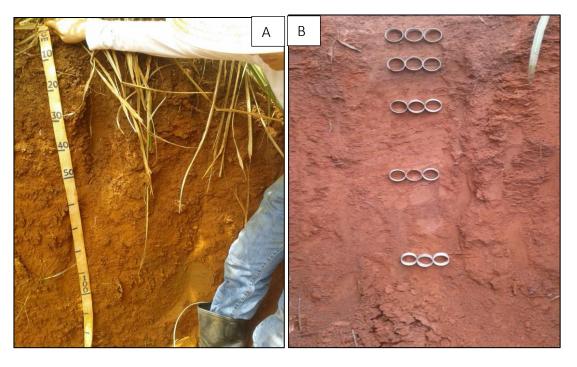


Figura 14. Determinação da profundidade do sistema radicular (A) e coleta das amostras indeformadas do solo (B).

4.17. EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO

A evaporação de água no solo foi determinada conforme (Armour et al., 2013) a Equação 35:

$$\mathsf{Es} = \mathsf{ETo}((\mathsf{min}(\frac{(\theta_{\mathsf{C}} - \theta_{\mathsf{AD}})}{(\theta_{\mathsf{S}} - \theta_{\mathsf{AD}})}, 1))^{3} (0.05 + \mathsf{exp}(-0.38 \mathsf{LAI}) - \mathsf{c}) - 0.1(1 - \mathsf{exp}(-0.38 \mathsf{LAI})) + 0.1)) \tag{35}$$

Em que ETo é a evapotranspiração de referência (Allen et al., 1998) θ_C , θ_{AD} e θ_S , o conteúdo de água no solo no dia do cálculo (θ_C), seco ao ar livre (θ_{AD}) e de saturação (θ_S), c é a fração do solo coberto cor palhada (neste trabalho assumido como sendo 0,8 para a área CP e 0 para a área sem cobertura).

4.18. FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram realizadas, no decorrer do ciclo da cultura, avaliações indiretas dos dados obtidos, sendo o fluxo de seiva pelo balanço de calor avaliado quanto às medidas em relação à radiação solar, e qualidade dos dados medidos, através de metodologia de Marin et al. (2008). Os dados de umidade do solo, obtidos indiretamente pela sonda Diviner 2000, foram analisados periodicamente para determinação da necessidade de irrigação.

Ao final do período experimental, os resultados obtidos foram analisados estatisticamente para determinar o efeito de dois tipos de manejo, com ou SP, no crescimento do canavial e na evapotranspiração, considerando a partição dos seus componentes. Esses dados foram submetidos à análise de variância com a realização do teste F e posteriormente ao teste de Tukey, ambos a 5% de probabilidade, por meio do programa estatístico SISVAR 5.3 (Ferreira 2008).

Na parametrização do modelo de Penman-Monteith, as análises dos dados foram basicamente de comparação entre valores medidos e estimados, incluindo-se aí o submodelo para rc. Para tanto, empregou-se como indicadores estatísticos o coeficiente de correlação (R²), o índice de concordância (d) de Willmott (Wilmott, 1981), além do índice de eficiência da modelagem (E) (Wallach et al., 2006).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERÍSTICAS BIOMÉTRICAS DA CULTURA E ANÁLISES TECNOLÓGICAS

5.1.1. PERFILHAMENTO

O número de perfilhos foi maior na área SP até cerca de 180 dias após o corte (DAC), a partir desse momento ele continuou maior, porém mais semelhante ao verificado na área com cobertura (Figura 15). Nota-se que apesar de todos os meses apresentarem maior número de perfilhos no tratamento SP, exceto o mês de janeiro, apenas os meses de outubro e novembro, apresentaram diferença estatística pelo teste de Tukey a p<0,05 (Tabela 4). Esse resultado foi semelhante ao verificado por Vasconcelos (2002) com as variedades IAC87-3184, que apresentou menor perfilhamento sob palhiço do que após colheita manual de cana queimada apenas no primeiro bimestre após o corte; e SP80-1842, que apresentou perfilhamento menor sob palhiço nos dois primeiros bimestres após o corte. Coincidem também com os resultados obtidos por Carvalho (1996) com as variedades SP70-1143 e RB72454, onde se constatou um efeito negativo, causado pelo palhiço ao perfilhamento inicial, mas sem alteração do número de colmos ao final do ciclo. Esse crescimento mais lento na área CP se deve ao fato de que a palha atua como barreira mecânica e, principalmente, como redutor da temperatura do solo e dos perfilhos brotados, enquanto estes ainda estão sob a palhada, determinando redução do processo fotossintético inicial (VASCONCELOS, 2002). Além disso, quando a cana é colhida no início do inverno, a redução da temperatura do solo provocada pela palha resulta em condição menos favorável à brotação das gemas (LEME FILHO, 2009).

Tabela 4. Média mensal, do número de perfilhos por parcelas, de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 2015.

| Manejo | Outubro | Novembro | Dezembro | Janeiro | Fevereiro |
|----------|----------|----------|----------|---------|-----------|
| СР | 476,25 a | 560,50 a | 494,25 a | 517 a | 392,50 a |
| SP | 613,75 b | 893,50 b | 614,00 a | 511 a | 442,50 a |
| C.V. (%) | 10,46 | 7,87 | 22,44 | 22,07 | 7,07 |

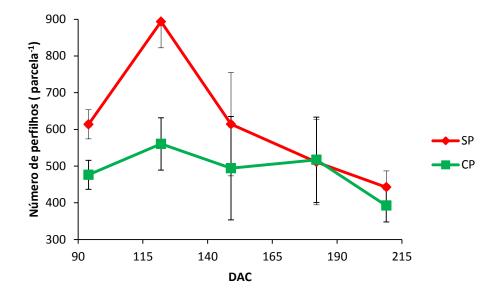


Figura 15. Número de perfilho por parcela, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 2015, de um canavial manejado CP e SP.

5.1.2. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

O índice de área foliar não apresentou diferença estatística pelo teste de Tukey (p<0,05, Tabela 5). Porém, apesar dele não diferir estatisticamente, verificouse que a média do índice de área foliar da área CP foi maior durante um intervalo de aproximadamente quatro meses, entre 150 dias e 270 dias após o corte (Figura 16). Essa maior tendência de IAF da área CP pode ter ocorrido devido ao menor estresse hídrico; uma vez que a literatura Inman-Bamber (2004) e Robertson et al. (1998), aponta relação clara entre o estresse hídrico e a redução e o IAF. Como reportado por Robertson et al. (1998) em um experimento no qual o crescimento da folha foi severamente reduzido pelo estresse hídrico, o IAF aumentou gradualmente até cerca de 4 nos tratamentos sob estresse, enquanto que nos tratamentos irrigados continuou a aumentar até cerca de 5.

Tabela 5. Índice de área foliar, média mensal, de um canavial manejado CP e SP, no período de setembro de 2014 a março de 2015.

| Manejo | Novembro | Dezembro | Janeiro | Fevereiro | Março |
|----------|----------|----------|---------|-----------|--------|
| СР | 1,14 a | 2,35 a | 3,51 a | 3,86 a | 3,07 a |
| SP | 1,29 a | 2,06 a | 3,15 a | 3,56 a | 3,14 a |
| C.V. (%) | 12,47 | 13,20 | 7,17 | 7,02 | 16,62 |

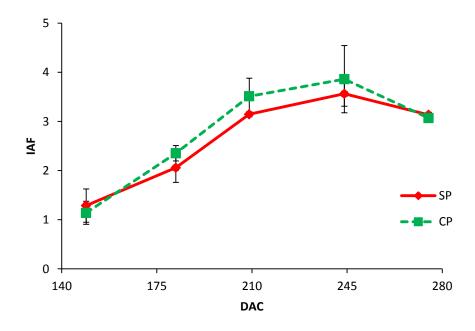


Figura 16. Evolução do índice de área foliar ao longo de dias após o corte, de um canavial manejado CP e SP.

5.1.3. TEOR DE CLOROFILA

O teor de clorofila da cana-de-açúcar da área manejada CP foi superior ao verificado na área SP, no período de novembro de 2014 a março de 2015 (Tabela 1). Verificou-se também que houve um maior consumo de fósforo na área manejada CP (Tabela 1). Rezende (2013), trabalhando com gramínea forrageira do gênero Brachiaria, verificou-se que a absorção do fósforo favorece também a absorção do nitrogênio pela forrageira, contribuindo assim com o incremento do teor de clorofila. Para Malavolta et al. (1997) o efeito positivo na medida indireta da clorofila, deve-se ao papel do fósforo na nutrição das plantas, o qual participando da molécula de ATP beneficia o processo ativo de absorção de nitrogênio. Outro fator que pode ter contribuído com esse resultado foi à adubação nitrogenada realizada no experimento, que foi um pouco superior à recomendada no boletim. A palha também pode favorecer a fixação biológica de N, existe algumas evidências de que a cultura possui um sistema natural de reposição do N exportado do solo anualmente com os colmos (Olivares, 1997) e diversos autores atribuem esses resultados à fixação biológica de nitrogênio, com a qual se pode suprir apreciável parte da necessidade nitrogenada da cultura de cana (RESENDE, 2000; POLIDORO, 2001).

Tabela 6. Teor de clorofila de um canavial manejado CP e SP

| Manejo | novembro | dezembro | janeiro | fevereiro | março |
|--------|----------|----------|---------|-----------|---------|
| СР | 56,17 a | 55,23 a | 46,93 a | 53,54 a | 51,03 a |
| SP | 53,41 b | 50,22 b | 42,22 b | 48,88 b | 48,22 b |

Letras iguais na vertical não diferem entre si, pelo teste de Tukey a p<0,05.

5.1.4. COMPRIMENTO DE COLMO

A emergência do colmo se deu a partir dos 90 dias após o corte. Vale notar que por volta dos 215 dias após o corte (em fevereiro de 2015), os colmos apresentavam cerca de 2 m de altura (Figura 17). Na Tabela 7, são apresentados os valores médios da altura de colmo de cada tratamento, pode-se observar que os diferentes tratamentos não resultaram em diferença estatística pelo teste de Tukey (p<0,05). Com isso, pode-se inferir que, neste experimento, a palhada não contribuiu para o incremento do comprimento dos colmos, pelo menos até aos 215 após o corte. Vale destacar que após 215 dias de ciclo houve tombamento do canavial, comprometendo assim as medidas. Durigan et al. (2004), avaliando o comprimento dos internódio da cana em função da cobertura do solo, também não encontraram diferença entre os tratamentos.

Tabela 7. Média mensal, do comprimento de colmo por parcelas, de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 2015.

| Manejo | Outubro | Novembro | Dezembro | Janeiro | Fevereiro |
|----------|---------|----------|----------|----------|-----------|
| СР | 8,80 a | 39,85 a | 84,83 a | 147,10 a | 189,35 a |
| SP | 6,85 a | 31,25 a | 78,60 a | 147,85 a | 190,30 a |
| C.V. (%) | 25,87 | 14,16 | 15,26 | 11,35 | 14,00 |

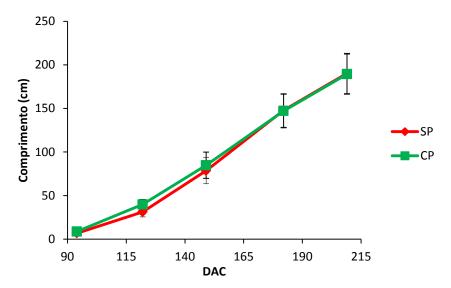


Figura 17. Comprimento do colmo (cm), no período de agosto de 2014 a fevereiro de 2015, de um canavial manejado CP e SP.

5.1.5. MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA

A massa fresca da parte aérea (colmo + folhas) apresentou diferença significativa pelo teste de Tukey a p<0,05 nos meses de março e abril; nos outros meses não houve diferença entre o canavial manejado CP e SP. No entanto, nota-se que existe uma tendência de não se diferir estatisticamente ao longo do ciclo da cultura e que a biomassa fresca da parte aérea é muito variável ao longo do ciclo da cultura (Tabela 8), sendo que os meses que apresentaram diferença estatística foram os com o maior desvio padrão da média. Resultados semelhantes também foram verificados por Leme Filho (2009) analisando a massa da parte aérea, em uma área manejada com e sem a presença de palha sobre o solo. Vale destacar que nos meses em que foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, também foram observados os maiores desvio padrão da média, o que pode ser decorrente do número relativamente baixo de repetições.

Tabela 8. Média mensal, massa fresca da parte aérea (t ha⁻¹), de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a maio de 2015.

| Manejo | Outubro | Dezembro | Janeiro | Fevereiro | Março | Abril | Maio |
|----------|---------|----------|---------|-----------|----------|----------|----------|
| СР | 3,56 a | 39,75 a | 103,1 a | 99,22 a | 197,60 a | 141,99 b | 175,99 a |
| SP | 5,85 a | 32,48 a | 103,2 a | 128,79 a | 159,79 b | 195,43 a | 167,77 a |
| C.V. (%) | 29,92 | 24,92 | 16,33 | 10,7 | 12,19 | 13,57 | 13,47 |

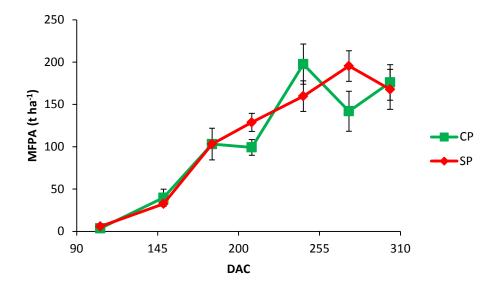


Figura 18. Massa fresca da parte aérea (MFPA), no período de outubro de 2014 a maio de 2015, de um canavial manejado CP e SP.

5.1.6. MASSA SECA DA PARTE AÉREA

A massa seca da parte aérea não apresentou diferença estatística pelo teste de Tukey a p<0,05 entre os tratamentos (Tabela 9) (Figura 19). Isso pode ter ocorrido devido à presença de irrigação que conforme Peres et al., (2010), a diferença entre o manejo com palha e sem palha é mais sentida em anos secos, pois em um ano chuvoso o conteúdo de água no solo entre os dois tratamentos são semelhante, o que pode ter contribuído com a semelhança no desenvolvimento da parte aérea dos tratamentos. Verifica-se também que a massa seca da parte aérea aumenta de forma mais acelerada até cerca de 240 dias após o corte e a partir de então, ela tende a se estabilizar. Resultados semelhantes formam verificados por Vasconcelos (2002) e Carvalho (1996).

Tabela 9. Média mensal, massa seca da parte aérea (t ha⁻¹), de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a maio de 2015.

| Manejo | Outubro | Dezembro | Janeiro | Fevereiro | Março | Abril | Maio |
|----------|---------|----------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| СР | 0,36 a | 3,58 a | 9,15 a | 10,38 a | 36,17 a | 29,37 a | 37,58 a |
| SP | 0,49 a | 4,24 a | 11,45 a | 19,40 a | 29,43 a | 36,68 a | 33,88 a |
| C.V. (%) | 41,47 | 21,04 | 19,02 | 46,56 | 30,47 | 21,78 | 19,4 |

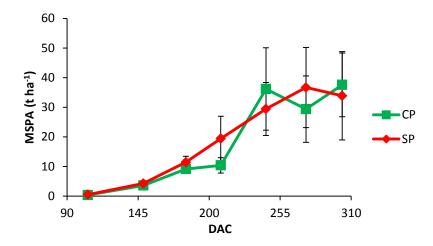


Figura 19. Massa fresca da parte aérea (MFPA), no período de outubro de 2014 a maio de 2015, de um canavial manejado CP e SP.

5.1.7. MASSA FRESCA DE COLMO

A massa fresca de colmo apresentou diferença estatística pelo teste de Tukey a p<0,05 no mês de março, apresentando uma maior produção de massa fresca de colmo no tratamento CP, nos outros meses não houve diferença entre os tratamentos (Tabela 10) (Figura 20). Esse resultado é semelhante ao verificado por Urquiaga et al. (1991), que também não encontrou diferença entre os tratamentos, porém constataram uma tendência de maior produtividade (cerca de 10%) no tratamento CP. Dessa forma, o uso de resíduos vegetais sobre o solo, pode promover maiores produtividades de colmos, principalmente em anos secos, o que indica possível viabilidade técnica deste manejo como alternativa para o aumento da produtividade dos canaviais Urquiaga et al. (1991). De acordo com Souza et al. (2008), o rendimento de colmos na cana soca é favorecido (ou incrementado) pelo manejo, com cultivo da palhada da planta crua, colhida mecanicamente.

Tabela 10. Média mensal, massa fresca de colmo (t ha⁻¹), de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 2015.

| Manejo | Dezembro | Janeiro | Fevereiro | Março | Abril | Maio |
|----------|----------|---------|-----------|----------|----------|----------|
| СР | 12,71 a | 66,00 a | 66,65 a | 149,10 a | 132,52 a | 152,33 a |
| SP | 4,36 a | 63,53 a | 85,34 a | 126,39 b | 146,34 a | 137,65 a |
| C.V. (%) | 68,16 | 18,22 | 13,00 | 14,35 | 16,68 | 11,69 |

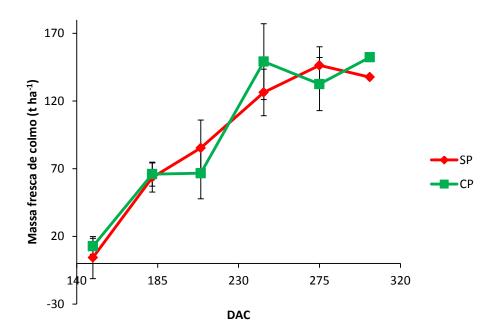


Figura 20. Massa fresca de colmo, no período de dezembro de 2014 a maio de 2015, de um canavial manejado CP e SP.

5.1.8. MASSA SECA DE COLMO

A massa seca de colmo não apresentou diferença estatística pelo teste de Tukey a p<0,05 durante o período experimental. Leme filho (2009), Vasconcelos (2002) e Carvalho (1996), ao estudar a produtividade da cultura, também não constaram diferença entre os tratamentos, manejado com cobertura e sem cobertura sobre o solo. Ainda convém lembrar, que mesmo não apresentando uma maior produtividade, existe uma tendência de maior produtividade na área CP, observado nos meses de março e maio e na produtividade final (Tabela 12). Portanto, mesmo não apresentado diferença estatística entre a produtividade de massa seca de colmos, é possível inferir que houve um algum efeito positivo da cobertura sobre o solo sobre o crescimento da cultura, além dos ganhos ambientais desse manejo, entretanto, o IAF e o comprimento de colmos não foram diferentes. Esse resultado corroboram com os resultados encontrados por Souza et al. (2005), o qual também não obteve diferença entre o cultivo da cana com despalha fogo e o cultivo da cana crua sem incorporação da palhada. Porém, conforme esses autores, quando a cana é cultiva sob o sistema de cana crua com incorporação da palhada além de

proporcionar maior produção de colmos, também proporciona maiores teores de matéria orgânica, maior estabilidade de agregados, macroporosidade e teor de água e menores valores de resistência do solo à penetração e densidade do solo, quando comparado ao sistema cana crua sem incorporação da palhada e cana queimada.

Tabela 11. Média mensal, massa seca de colmo (t ha⁻¹), de um canavial manejado CP e SP, no período de outubro de 2014 a fevereiro de 2015.

| Manejo | Dezembro | Janeiro | Fevereiro | Março | Abril | Maio |
|----------|----------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| СР | 1,06 a | 5,47 a | 6,02 a | 29,82 a | 23,20 a | 30,34 a |
| SP | 0,44 a | 7,20 a | 14,38 a | 24,30 a | 29,27 a | 27,67 a |
| C.V. (%) | 52,84 | 29,19 | 64,85 | 38,03 | 21,17 | 12,08 |

Letras iguais na vertical não diferem entre si, pelo teste de Tukey a p<0,05. C.V., coeficiente de variação.

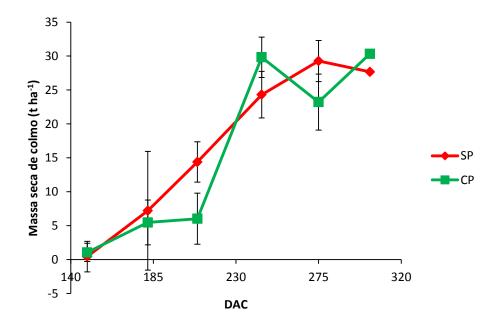


Figura 21. Massa seca colmo, no período de dezembro de 2014 a maio de 2015, de um canavial manejado CP e SP.

5.1.9. PRODUTIVIDADE FINAL

Para colheita integral da parcela, não se observou diferença estatística entre os dois tratamentos pelo teste de Tukey (p<0,05, Tabela 12). Porém, a área manejada com cobertura do solo apresentou média de produtividade cerca de 10% superior à verificada na área SP. Resultados semelhantes foram encontrados por Urquiaga et al. (1991), que ao estudarem os dois sistemas de manejo (mas com a

despalha a fogo) em 5 soqueiras seguidas constataram que a média de colheita de cana crua (67 t ha⁻¹) superou ao do sistema de manejo sem cobertura em 10%. Leme filho (2009) também não encontrou diferença significativa no cultivo do canavial manejado com palhada, assim como VASCONCELOS (2002), DURIGAN et al. (2004) e CARVALHO (1996).

Urquiaga et al. (1991) também observaram que nos anos mais secos, quando a distribuição de chuvas foi irregular, o sistema de colheita da cana crua superou em 25% os rendimentos do sistema sem cobertura. No caso do presente trabalho, pode-se apontar a maior tendência de IAF (Figura 16), maior transpiração (Figura 38) como possíveis causas para o melhor desempenho. Além disso, a palha melhora a estrutura do solo e incrementa a matéria orgânica do solo, que favorece também o aumento da atividade microbiana que, aliada à mineralização, disponibiliza nutrientes às plantas, induzindo acréscimos na produtividade da cultura (SOUZA et al., 2005). A palha, muitas vezes, não atua de forma isolada, mas sim em conjunto com complexos processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem no solo (HECKLER; SALTON, 2002).

Tabela 12. Produtividade do canavial manejado CP e SP

| Manejo | Produtividade (t/ha) |
|----------|----------------------|
| СР | 133,71 a |
| SP | 121,24 a |
| C.V. (%) | 8,75 |

Letras iguais na vertical não diferem entre si, pelo teste de Tukey a p<0,05.

5.1.10. ANÁLISES TECNOLÓGICAS

A máxima quantidade de açúcar teoricamente recuperável (ATR) (Figura 22 A) se deu aos 302 dias após o corte, assim como a porcentagem de massa açucarada (POL) no caldo (Figura 22 B). Nota-se, também, certa semelhança de ATR e POL entre os tratamentos estudados. Outro fator interessante foi que as produções tanto de ATR quanto de POL foram semelhantes entre os dois tratamentos, sem apresentar diferença significativa pelo teste de Tukey (p<0,05) e corroborando com os resultados obtidos por LEME FILHO (2009).

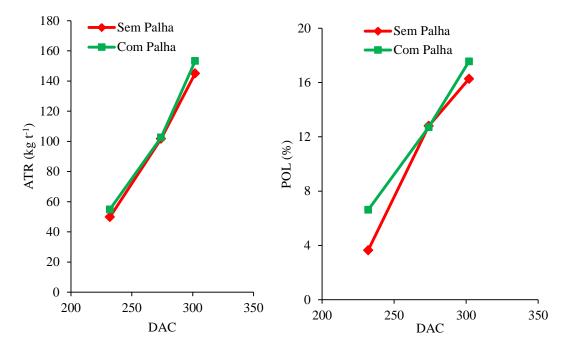


Figura 22. Açúcar teoricamente recuperável (ATR) (A) e porcentagem de massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada (POL) (B), de um canavial manejado CP e SP

A porcentagem de fibra do canavial apresentou a maior diferença entre os tratamentos aos 232 dias após o corte (DAC), apresentando uma média de 18,33 e 39,49%, para os tratamentos CP e SP, respectivamente (Figura 23). Verifica-se, também, que nos demais dias analisados, essa diferença foi pequena e aos 302 DAC, a cana do tratamento CP apresentou 11,06% de fibra e, na área SP, 10,32%. De acordo com Oliveira et al. (2009), o teor de fibra aumenta a resistência à extração do caldo, recomendando-se valor médio entre 10,5 e 12,5% para a manutenção energética das indústrias que processam a cana-de-açúcar. Dessa forma, o teor médio da fibra observado, tanto para CP e SP pode ser considerado adequado e não interfere na eficiência da extração do caldo.

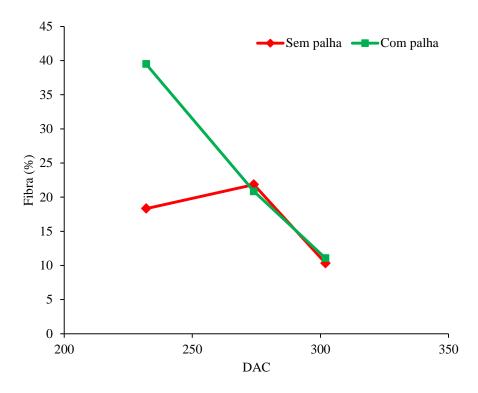


Figura 23. Porcentagem de fibra contida nos colmos da cana-de-açúcar, de um canavial manejado CP e SP.

5.2. FLUXO DE SEIVA

O fluxo de seiva, acumulado em períodos de 9 dias, da cana-de-açúcar da área manejada CP foi superior ao verificado na área SP, durante os meses de março, abril e começo de maio de 2015 (Tabela 13). Se considerarmos que a população de cana num hectare é de, aproximadamente, 130 mil plantas, essa diferença por período entre a transpiração da área manejada CP e SP seria de 192,4 mil litros por hectare. Isso deixa evidente a importância da cobertura do solo sobre a transpiração do canavial. De acordo com ALVES (1999), a evaporação da água na superfície das folhas produz um movimento da água no interior da planta (fluxo de seiva) a partir da absorção da água no solo pelas raízes. Consoante Vasconcelos (2002), a alteração do sistema de colheita da cana queimada manual para cana crua mecanizada reduz a amplitude térmica do solo, aumenta o teor de água e de matéria orgânica no solo. Dessa forma, pode-se constatar que a palhada favorece a absorção de água pelas plantas, pois melhora a estrutura do solo e reduz o efeito das variáveis climáticas sobre a evaporação de água do solo.

Tabela 13. Síntese dos valores de análise de variância e do teste de Tukey a p<0,05, para a transpiração acumulada, durante cinco períodos de 9 dias.

| Manejo | Transpiração (L colmo ⁻¹ periodo ⁻¹) |
|----------|---|
| СР | 5,94 a |
| SP | 4,46 b |
| C.V. (%) | 16,5 |

Letras iguais na vertical não diferem entre si, pelo teste de Tukey a p<0,05. C.V., coeficiente de variação.

A transpiração da cana-de-açúcar da área manejada CP foi superior à verificada na área SP no período de março a maio de 2015 (Figura 24 A). Isso pode ter ocorrido devido à redução da evaporação em decorrência da presença de palha (Figura 37), aumentando assim a disponibilidade hídrica no solo para a cultura. A transpiração do canavial é maior entre as 14 e 15 horas (Figura 24 B), como consequência da maior disponibilidade de energia e do déficit de pressão de vapor.

As áreas CP e SP apresentaram transpiração média de 1,16 e 0,79 L m⁻² de folha verde d⁻¹, respectivamente. Nassif (2015) trabalhando com a mesma cultivar, porém em cana planta no ano de 2013, com colmos com aproximadamente 0,34 m² de folha, em cultivo sem cobertura do solo e nos meses de maio (do dia 14 ao dia 30), junho e julho (do dia 16 ao dia 4 de julho), encontrou uma transpiração média de 0,7 L m⁻² de folha verde d⁻¹. Essa maior transpiração encontrada no presente estudo pode ser decorrente de colmos com maior AF, além de épocas diferentes (leituras realizadas do 21 de março ao dia 06 de maio de 2015), e evidentemente, com diferença quanto à disponibilidade de energia.

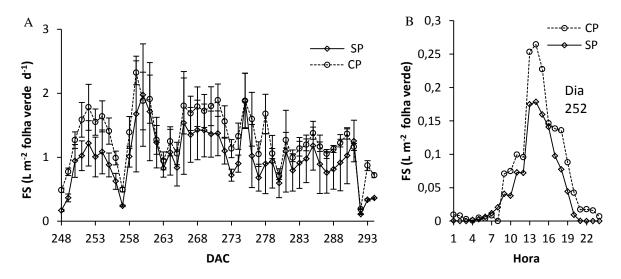


Figura 24. Fluxo de seiva (FS) de um canavial manejado CP e SP, do dia 21 de março ao dia 6 de maio de 2015 (A) e variação horaria do fluxo de seiva no dia 25 de março de 2015 (B).

Ao analisar o fluxo de seiva em relação ao Rn dos tratamentos CP e SP, verificou-se que foi representado por modelo de regressão linear, sendo que na medida em que se aumenta o Rn, aumenta-se também o fluxo de seiva (Figura 25). Isso mostra que de fato, a cana tende a elevar sua transpiração quando se tem um saldo de radiação elevado e combinado com uma maior disponibilidade hídrica para a cultura. Conforme Leuzinger et al. (2010) a transpiração das plantas é um componente do balanço de energia que é influenciada por 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.

Outro fator importante que se pode constatar, é que na área manejada CP a cultura incrementou a transpiração e o Rn, associado a isso, se pode mencionar o aumento do conteúdo de água no solo, conforme mostrado na Figura 28 A. À medida que a água se torna limitante, a transpiração é reduzida (WANG & GARTUNG, 2010). Já o Rn maior verificado na área CP, pode ter ocorrido devido a capacidade de refletância da palha.

Um dos fatores que contribui com a perda de água da cana pelas folhas é o Rn elevado. Conforme Silva et al., (2013), a evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro é mais fortemente controlada pela energia disponível, proveniente do saldo de radiação, do que pela interação da superfície da cultura com o ar do ambiente de cultivo, influenciada pelo vento, temperatura e umidade do ar.

A disponibilidade de energia é de fundamental importância na transpiração. A exemplo disso, pode-se citar os valores de transpiração medidos por Chabot et al. (2005) em região semiárida do Marrocos, com consumo médio de 8 mm dia⁻¹. No presente trabalho, vale destacar, os valores convertidos em lâminas de transpiração variam entre 3,45 e 2,39 mm d⁻¹ para área CP e SP, respectivamente. Nassif et al. (2014), trabalhando com cana planta e utilizando sensores de fluxo de seiva no município de Piracicaba, encontraram uma transpiração variando entre 3,4 e 4,2 mm d⁻¹.

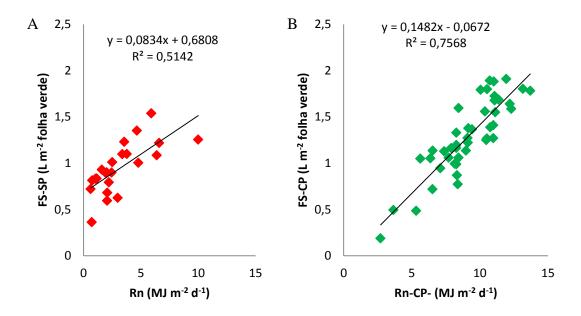


Figura 25. Relação entre o saldo de radiação (Rn) e o fluxo de seiva (FS), em um canavial manejado SP, (A) e CP, (B).

5.3. CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA

A condutância estomática (gs) nos meses de novembro e janeiro foi menor na área CP, durante as primeiras horas do dia, e a partir de janeiro ela é maior ou igual (Tabela 14). No final do dia, de modo geral, os valores de gs foram menores ou iguais à área SP; geralmente, esteve mais elevada nos horários próximos às 14 horas (Figura 26), com exceção do mês de dezembro (quando a campanha de medida foi feita sob forte nebulosidade). A gs apresenta elevada variação ao longo do dia e na medida em que ela aumenta, aumenta também essa variação, ocorrendo assim, coeficientes de variação elevados próximo as 14 horas (Tabela 14). Isso acontece pois, ao mesmo tempo em que as plantas necessitam abrir os estômatos para absorver CO₂ e, assim, realizar a fotossíntese, também precisam fechá-los para evitar a perda de água para a atmosfera e próximo às 14 horas, a demanda atmosférica é elevada. A solução encontrada está fundamentada na regulação temporal da abertura estomática (BOEHRINGER, 2010).

Os resultados encontrados são semelhantes aos verificados por Gonçalves et al. (2010), que ao avaliar 4 variedades de cana-de-açúcar, encontraram gs média entre 50 e 200 mmol m⁻²s⁻¹. Roberts et al. (1990) verificaram que em canavial submetido a irrigação plena, a gs variou entre 200 e 600 mmol m⁻²s⁻¹, os valores inferiores de gs encontrado no trabalho pode ser devido ao déficit hídrico. Machado

et al. (2009), avaliando a resposta da cultura da cana-de-açúcar ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, constataram que o déficit hídrico ocasionou decréscimo da gs independente da fase de desenvolvimento da cultura. Essa resposta é esperada e considerada uma das primeiras estratégias da planta para impedir a desidratação excessiva das folhas (Inman-Bamber & Smith, 2005). Nassif (2015) também constatou que, nos dias com maior incidência de radiação, ocorre um rápido aumento de gs, atingindo seu pico por volta do meio dia, seguida de queda no período vespertino. Nos dias nublados, essa tendência também foi verificada, porem com menor amplitude de variação temporal ao longo do dia.

Tabela 14. Síntese da análise de variância e do teste de Tukey (p<0,05) para a condutância estomática, no período de novembro de 2014 a abril de 2015, comparando-se o tratamento CP e SP.

| | Condutância estomática (mmol m ⁻² s ⁻¹) | | | | | | | | |
|-----------|--|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|--|
| Manejo | novembro | dezembro | janeiro | fevereiro | março | abril | M.G | | |
| C.P. 10 h | 34,66 b | 29,33 a | 70,81 b | 21,19 a | 23,29 a | 21,31 a | 33,43 a | | |
| S.P. | 43,89 a | 32,71 a | 121,83 a | 15,71 a | 14,64 b | 18,6 a | 41,23 a | | |
| Manejo | 13,69** | 1,34 ^{ns} | 14,61** | 3,58 ^{ns} | 6,63* | 0,37 ^{ns} | 0,18 ^{ns} | | |
| C.V. (%) | 11,88 | 17,64 | 25,92 | 29,31 | 33,12 | 42,1 | 85,81 | | |
| C.P. 12 h | 110,65 a | 6,87 a | 141,12 a | 29,89 a | 31,4 b | 36,84 a | 59,46 a | | |
| S.P. | 95,83b | 6,37 a | 88,91 b | 26,79 a | 59,79 a | 25,1 a | 50,46 a | | |
| Manejo | 6,23* | 0,33 ^{ns} | 9,26* | 0,31 ^{ns} | 22,24** | 2,87 ^{ns} | 0,12 ^{ns} | | |
| C.V. (%) | 10,72 | 25,05 | 27,91 | 36,65 | 24,5 | 41,89 | 83,37 | | |
| C.P. 14 h | 89,83 a | 8,86 b | 103,31 a | 35,43 a | 31,31 a | 46,81 a | 52,59 a | | |
| S.P. | 83,82 a | 17,04 a | 109,36 a | 35,79 a | 52,0 a | 67,77 a | 60,96 a | | |
| Manejo | 0,88 ^{ns} | 16,08** | 0,164 ^{ns} | 0,004 ^{ns} | 2,88 ^{ns} | 2,6 ^{ns} | 0,17 ^{ns} | | |
| C.V. (%) | 12,56 | 29,5 | 26,29 | 29,22 | 54,73 | 42,41 | 61,53 | | |
| C.P. 16 h | 56,79 a | 13,30 b | 40,31 a | 41,21 a | 9,03 b | 11,63 b | 28,71a | | |
| S.P. | 63,49 a | 17,14 a | 35,91 a | 44,90 a | 18,89 a | 23,81 a | 34,02a | | |
| Manejo | 1,84 ^{ns} | 8,01* | 0,135 ^{ns} | 0,23 ^{ns} | 16,11** | 8,06* | 0,23ns | | |
| C.V. (%) | 15,36 | 16,69 | 58,85 | 33,7 | 32,92 | 45,31 | 60,52 | | |
| C.P. 18 h | 31,39 a | 14,41 b | 18,61 a | 7,07 b | 7,23 a | 17,23 a | 15,99 a | | |
| S.P. | 13,66 a | 27,83 a | 24,97 a | 29,09 a | 8,69 a | 19,49 a | 20,62 a | | |
| Manejo | 71,35** | 56,37** | 3,48 ^{ns} | 14,84** | 0,82 ^{ns} | 1,07 ^{ns} | 0,87 ^{ns} | | |
| C.V. (%) | 17,43 | 15,82 | 29,24 | 59,13 | 37,75 | 22,24 | 46,96 | | |

Letras iguais na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a (P<0,05). ^{ns}: não significativo; : significativo (P<0,05); : significativo (P<0,01); C.V.: coeficiente de variação; C.P: manejo com palha; S.P.: manejo sem palha. M.G. média geral.

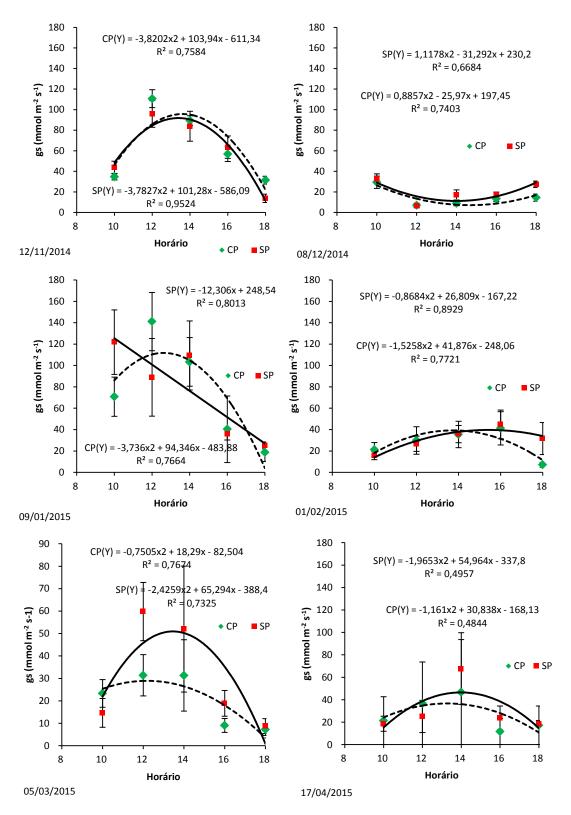


Figura 26. Variação horária da condutância estomática (gs) de um canavial manejado CP e SP, nos meses de novembro e dezembro de 2014 e janeiro, fevereiro, março e abril de 2015 em Piracicaba.

5.4. CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO

A umidade do solo média do canavial da área manejada CP foi similar à verificada na área SP, no período de setembro de 2014 a fevereiro de 2015 (Tabela 15), (Figura 27). Dessa forma, fica evidente que manter a palha sobre o solo não incrementa de forma significativa o conteúdo de água no solo, isso pode ter ocorrido, pois mesmo que ocorra menor perda de água por evaporação quando se mantém a palha sobre o solo, essa perda é muito pequena e interfere apenas na camada superficial e no início do ciclo, quando o IAF é pequeno. Isso pode ser verificado na Figura 28 A, onde existe uma tendência de maior umidade até os 140 DAC no tratamento CP. No mês de agosto houve diferença estatística pelo teste de Tukey a p<0,05, isso pode ter ocorrido devido parte da lamina de irrigação ou água da chuva ficar retida na palha e não chegar efetivamente no solo. A partir do mês de agosto o número de perfilho (Figura 15) já era elevado na área SP, o que pode ter contribuído com o consumo hídrico e deixado o conteúdo de água no solo semelhante ao tratamento CP.

Tabela 15. Conteúdo de água no solo na camada de 0 a 80 cm, média mensal, de um canavial manejado CP e SP, no período de agosto de 2014 a fevereiro de 2015.

| Manejo | Agosto | Setembro | Outubro | Novembro | Dezembro | Janeiro | Fevereiro | MG |
|----------|---------|----------|---------|----------|----------|---------|-----------|---------|
| СР | 27,83 b | 30,07 a | 28,93 a | 31,74 a | 32,15 a | 32,00 a | 33,15 a | 30,84 a |
| SP | 28,58 a | 29,78 a | 29,65 a | 32,79 a | 32,94 a | 31,80 a | 34,28 a | 31,40 a |
| C.V. (%) | 1,35 | 4,59 | 6,22 | 5,92 | 4,92 | 16,46 | 12,45 | 7,42 |

Letras iguais na vertical não diferem entre si, pelo teste de Tukey a p<0,05. C.V., coeficiente de variação; M.G. média geral.

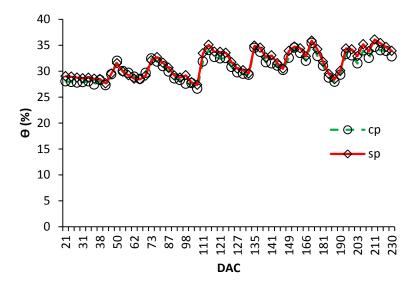


Figura 27. Umidade volumétrica do solo (Θ) na camada de 0 a 80 cm, no período de agosto de 2014 a fevereiro de 2015, de um canavial manejado CP e SP.

O conteúdo de água no solo da área CP tende a ser maior do que da área CP apenas na camada de 0 a 20 cm de profundidade. No período que vai até 140 DAC (Figura 28 A). De acordo com Peres et al., (2010), a presença da palha da cana-de-açúcar na superfície do solo reduziu as perdas de água praticamente à metade daquela verificada na condição de solo descoberto, na camada de 0 a 20 cm. Os autores também observaram que a influência da cobertura de palha da cana-de-açúcar na umidade volumétrica do solo diminuiu com a profundidade do solo e, ainda, que a perda de água no solo na condição SP se dá praticamente por evaporação, enquanto na condição com palha a perda de água ocorreu preponderantemente por percolação profunda. Assim como verificado por Vianna et al (2015), os autores também postularam que a palhada funcionou como um isolante térmico, impedindo a incidência de radiação diretamente sobre o solo, especialmente nas fases iniciais da cultura, quando a copa ainda não cobriu a superfície do solo.

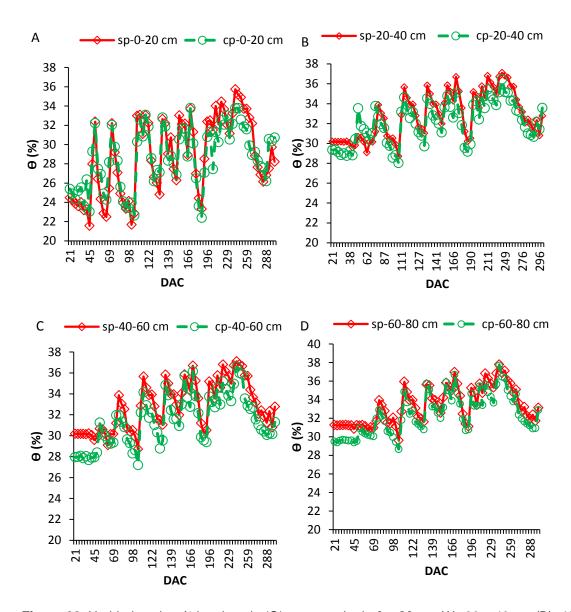


Figura 28. Umidade volumétrica do solo (Θ) na camada de 0 a 20 cm (A), 20 a 40 cm (B), 40 a 60 cm (C) e de 60 a 80 cm (D), no período de 17 DAC a 300 DAC, de um canavial manejado CP e SP.

5.5. COEFICIENTE DE CULTURA

O coeficiente de cultura do canavial manejado SP foi superior ao verificado na área CP, até aproximadamente 150 DAC. A partir desse momento, o Kc da área CP foi superior (Figura 29). Isso pode ter ocorrido, pois nos estádios iniciais, o número de plantas (Figura 15) e a evaporação (Figura 37) da área sem cobertura, foram maiores, contribuindo com o incremento do consumo hídrico. Os valores de Kc da área SP (0,43; 1,02; 1,16 e 0,52) está semelhante ao recomendado pelo boletim 24 (FAO, 79) (Doorembos & Pruitt, 1977), porém os valores de Kc para a área

manejada com cobertura (0,37; 0,77; 0,83 e 0,7) são menores que os recomendados (0,4-0,5 no início; 0,7-1 no desenvolvimento; 1-1,3 no estádio intermediário da cultura; de 0,75-0,8 no final de desenvolvimento da cultura e de 0,5 a 0,6 na colheita). Vale ressaltar que a cultura foi colhida com aproximadamente 11 meses após o corte (período que foi de 16 de julho de 2014 a 30 de maio de 2015) e que os valores de Kc aqui determinados, levou em conta um período de cerca de 180 dias, que foi de agosto de 2014 até o início do mês de fevereiro de 2015, uma vez que houve tombamento do canavial no mês de março, provocado pelo vento.

Na Fase I, os valores apresentaram média de 0,43 para o tratamento SP e de 0,37 para o tratamento CP, corroborando com os valores sugeridos no boletim 56 da FAO (Kc \sim 0,40) (Allen et al., 1998) e por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003) (Kc \sim 0,40).

Na Fase II houve um incremento nos valores de Kc aumentaram para 0,77 e 1,02, para área CP e SP, respectivamente. Souza et al. (1999) observaram valores variando entre 0,85 e 1,02, corroborando com o Kc encontrado para área sem cobertura, porém superior ao encontrado na área CP. Isso pode ter ocorrido, devido ao baixo número de plantas (Figura 15) e evaporação (Figura 37).

O Kc observado para o máximo crescimento da cultura (Fase III) para o manejo CP (0,83) e SP (1,16) foi 33,6 e 7,2%, respectivamente, menor que o recomendado por Allen et al., (1998), que é de 1,25. Esse mesmo Kc de 1,25 para o máximo crescimento, também foi determinado para o uso em canaviais irrigados na Austrália e Swazilândia, em estudo realizado por Inman-Bamber e McGlinchey (2003) e posteriormente por Olivier e Singels (2012) para a África do Sul.

Na Fase IV, verificou-se que os valores de Kc reduziram 0,7 e 0,52, para a área CP e SP, respectivamente. O valor de 0,7, da área CP, é igual ao informado no Boletim 56 da FAO, e o Kc da área SP foi inferior, porém está dentro do intervalo sugerido pelo boletim 24 da FAO (0,5-0,6). Essa diferença pode ter ocorrido devido o número de plantas já ser semelhante nos dois tratamentos, e a menor evaporação no tratamento CP, disponibilizar mais água para a cultura. Além disso, de acordo com Marin et al., (2016), os valores de Kc da cana, depois que a cultura cobre completamente o solo, diminui com a ETo, assim como em café e os citros. Esses autores também observaram que a transpiração e a ETc não segue linearmente a ETo, apresentando variação ao longo do ciclo da cultura, o que pode resultar em uma diminuição no Kc (e Kcb) mesmo com valores de ETo elevado.

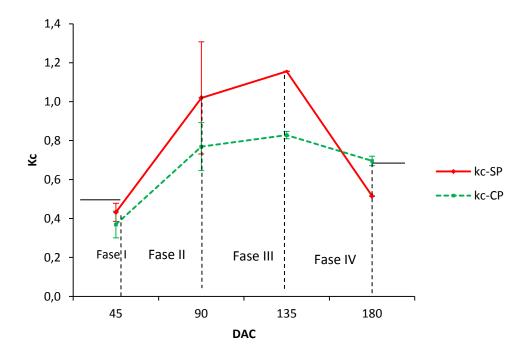


Figura 29. Coeficiente de cultivo, (obtido por meio da determinação da evapotranspiração real da cultura usando o balanço hídrico do solo e a evapotranspiração de referência, usando o método de Penman Monteith), em relação ao DAC, de um canavial manejado CP e SP.

5.6. ANÁLISE E ESTIMATIVA DAS VARIÁVEIS DO MODELO DE PENMAN-MONTEITH

5.6.1. ENERGIA RADIANTE ABSORVIDA PELAS PLANTAS

A Figura 30 apresenta as curvas de variação do saldo de radiação efetivo do canavial (Rnef), do saldo de radiação do gramado no posto meteorológico da ESALQ (Rn), do saldo de radiação medido na horizontal acima do canavial (Rnac) no tratamento CP (Figura 30 A) e SP (Figura 30 B) e da radiação solar global (Qg) ao longo de dois dias representativos. Interessante notar aos 268 DAC que os Rnef e o Rnac foi superior no tratamento CP, o que parece ser consequência dos maiores valores de IAF na área manejada com palha.

Pode-se observar que o Rn, Rnef e o Rnac acompanha a disponibilidade de radiação Qg em ambos os tratamentos. Verifica-se ainda que aos 268 DAC, por volta do meio dia apresentou os valores máximos de Qg, Rn, Rnef e de Rnac, tanto para a área CP quanto para a área SP. Resultados semelhantes foram obtidos por André et al., (2010) e atribuiu tal fato ao menor ângulo de incidência dos raios solares, causando maior penetração e retenção da radiação no interior da

comunidade vegetal. Essa maior incidência de radiação das 12 as 14 horas também favorece a redução do rc (Figura 34) e consequentemente da elevação da transpiração do canavial.

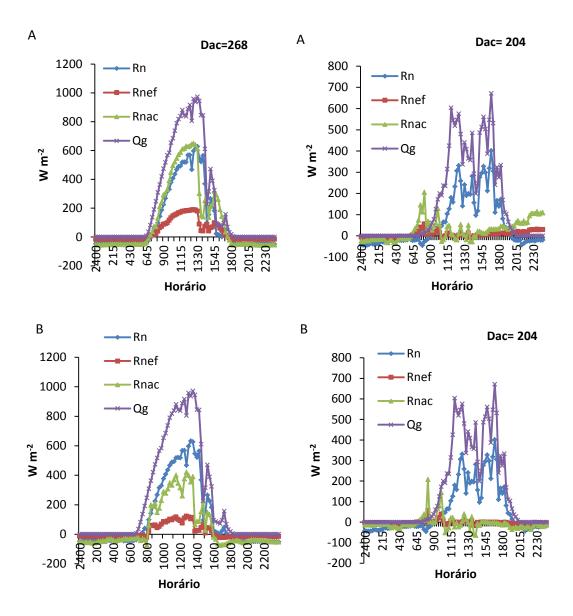


Figura 30. Evolução horária do saldo de radiação líquido (Rn), do balanço de energia do canavial (Rnef), acima da copa (Rnac) e do saldo de radiação global (Qg), num dia com elevada incidência de radiação, aos 268 DAC e num dia nublado, aos 204 DAC, de um canavial manejado CP (A) e SP (B).

A Figura 31 mostra a relação entre o soldo de radiação de um gramado e do saldo de radiação efetivo no canavial (A e C) e do saldo de radiação acima da cana (B e D), de uma area manejada CP (Figura 31 A e B) e SP (Figura 31 C e D). Notase que existe alta relação entre Rn e Rnef e Rnac, apresentando R² de 0,85 para (A e B) e de 0,83 para (C e D), respectivamente. Marin (2003c), trabanhando com a

cultura do café, também encontrou boa correlação entre o saldo de radiação medido sobre o gramado e a energia absorvida por unidade de área foliar e a energia total radiante absorvida por quatro plantas de café, com coefincente de determinação de 0,91.

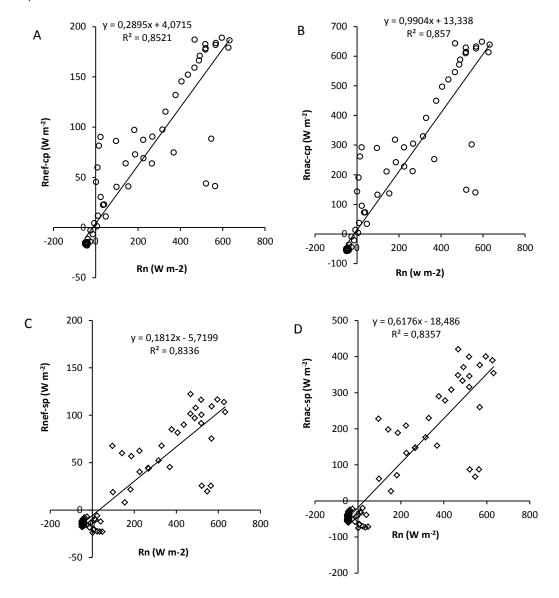


Figura 31. Relação entre o saldo de radiação de um gramado e o saldo de radiação efetivo do canavial (A e C) e pelo saldo de radiação acima do canavial (B e D), de um canavial manejado CP e SP.

Ao observar a Figura 32, verifica-se que existe relação entre o saldo de radialção global e o Rnef e o Rnac, tanto para o tratamento CP (Figura 32 A e B), quanto para o tratamento SP (Figura 32 C e D). Nota-se que também que ambos os tratamentos foram representado por modelo de regressão linear, apresentando coeficiente de determinaração de 0,85 para (A), de 0,86 para (B), e de 0,84 para (C

e D). Isso mostra que de fato, na medida em que se aumenta o Qg, aumenta-se também o Rnef e o Rnac. Conhecer essa relação é importante uma vez que não é comum se determinar o Rnef e o Rnac nas propriedades agrícolas e o Qg é facilmente encontrado nas estações meteorológicas e assim, pode-se favorecer a estimativa da evapotranspiração da cultura pelo método de PM.

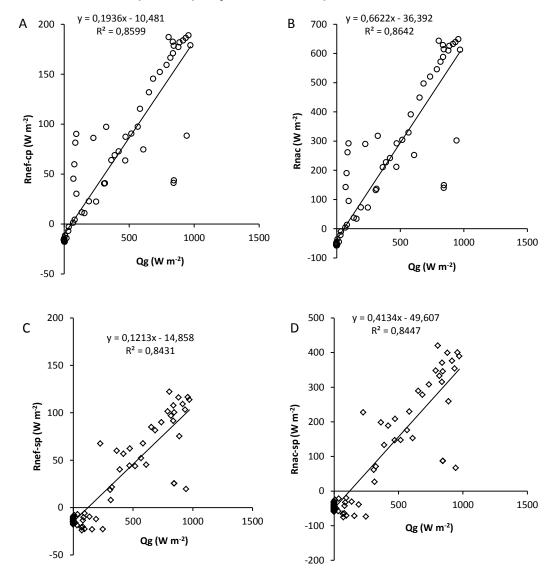


Figura 32. Relação entre o saldo de radiação global (Qg) e o saldo de radiação efetivo do canavial (A e C) e o saldo de radiação acima do canavial (B e D), de um canavial manejado CP e SP.

5.6.2. RESISTÊNCIA AERODINÂMICA

A Figura 33 mostra a relação entre a resistência aerodinâmica, estimada com o modelo de Stokes et al., (2016), e a velocidade do vento ajustada a 10 m, de uma área manejada CP (A) e SP (B). Nota-se que a relação foi ajustada por modelo

de uma potência, com coeficiente de determinação de 0,99, para ambos os tratamentos. Isso mostra que de fato, a velocidade do vento interfere fortemente na ra. Nota-se ainda que a resistência aerodinâmica da área manejada sem cobertura sobre o solo foi maior que da área com cobertura, isso ocorre devido no canavial sem cobertura ter emitido perfilhos mais rapidamente e com uma maior altura no início do ciclo, quando comparado com a cana manejada com cobertura, o que interfere no comprimento da rugosidade e consequentemente, na maior resistência aerodinâmica da cultura, que pode resultar em uma menor transpiração na área SP.

Na cultura da cana-de-açúcar onde o dossel é fechado e ra é alta durante quase todo o crescimento da cultura é importante levar e consideração na hora de dimensionar e parametrizar a copa, o efeito da ra sobre a transpiração, principalmente para modelos de transpiração que não usam totalmente o modelo de PM (Stokes et al., 2016). Esses autores apontam que o efeito do fechamento dos estômatos sobre a transpiração depende da resistência estomática e da resistência aerodinâmica. Quando a resistência estomática é grande em relação à resistência aerodinâmica ocorre uma redução da condutância estomática com um aumento da concentração de CO₂ e que reflete numa redução da transpiração.

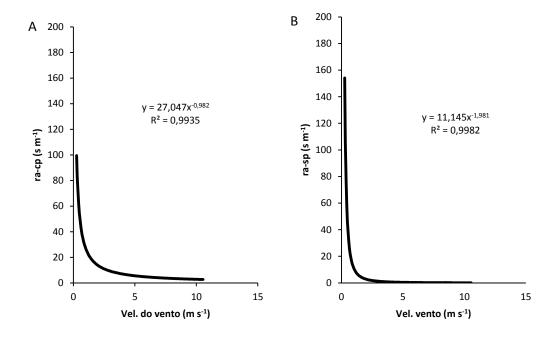


Figura 33. Relação entre os valores de resistência aerodinâmica estimada com o modelo de Stokes et al., (2016) e a velocidade do vento ajustada a 10 m, de um canavial manejado CP (A) e SP (B).

5.6.3. RESISTÊNCIA FOLIAR À DIFUSÃO DE VAPOR

Compararam-se os valores estimados de rc (Eq. 20) com as médias horárias de rc medida com porômetro e verifica-se que o modelo proposto tem relação com os valores de rc medidos em campo, em ambos os tratamentos (Figura 34). Nota-se também que tanto no tratamento CP quando no SP, os valores de rc foram semelhantes. Ao analisar os valores medidos e estimados ao longo do dia, verifica-se que no dia 08/12/2014 os valores ficaram muito diferente, isso pode ter ocorrido devido a um problema na bomba do pivô central que não possibilitou realizar a irrigação no início do mês de dezembro e consequentemente ocorreu um déficit hídrico.

Outro fator que deve ser levado em conta ao analisar a resistência à cobertura, é as dificuldades associadas à modelagem de rc, tanto pelos problemas originários da medição com a técnica porométrica, como também pela dificuldade de amostragem representativa de folhas de toda a planta. Além disso, essa variabilidade é comumente encontrada em medidas de rc no campo, em consequência das diferentes condições de exposição das folhas à radiação solar e ao vento, das condições fisiológicas internas das folhas e da oscilação temporal da abertura estomática (MARIN, 2003a).

A rc tende a ser mínima das 12 às 14 horas, isso pode ter ocorrido devido as maiores temperaturas e radiação solar nesse horário (Figura 30 A e B). Nassif (2015), também constatou que nos dias com maior incidência de radiação ocorre uma redução rápida da rc, atingindo seu pico por volta do meio dia e no período vespertino, verificou-se um aumento mais suave e constante, e atribuiu tal fato aos dias nublados e com menor insolação. Além disso, de acordo com Marin (2003c) o efeito das altas temperaturas foliares e de forma indireta, do Δ e, exercem papel de suma importância na regulação estomática, pois as folhas são muito sensíveis às condições ambientais e, por conseguinte, afeta suas relações hídricas.

Durante quase todo o dia a rc do canavial ficou acima de 500 s m⁻¹, indicando certa resistência ao processo de evapotranspiração. Ao longo do ciclo, os valores da ra foram, na sua maioria, inferiores aos da rc, indicando que as trocas de LE, por efeito de mecanismos turbulentos, foram mais eficientes, comparadas à transferência de vapor a partir do dossel da cultura (VERMA et al., 1976; SANTOS & BOUHID, 1999; SILVA, et al. 2013).

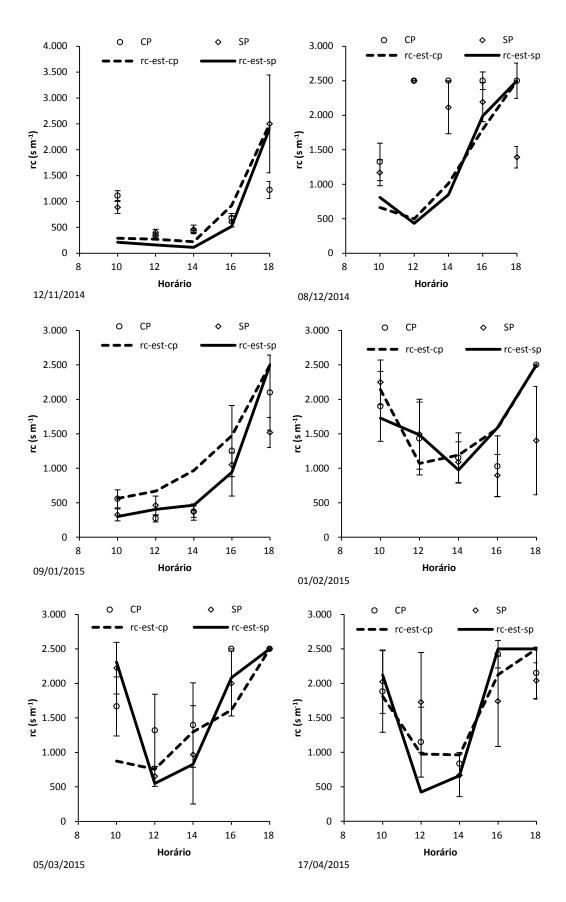


Figura 34. Variação horária da resistência estomática (rc) medida em relação aos valores de resistência estomática estimada (est), de um canavial manejado CP e SP, nos meses de novembro e dezembro de 2014 e janeiro, fevereiro, março e abril de 2015 em Piracicaba.

A Figura 35 mostra a relação entre os dados de rc medidos e os estimados, por meio do modelo de estimativa de rc proposto, em uma área manejado CP (Figura 35 A) e em outra SP (Figura 35 B). Verifica-se que o modelo apresentado tem relação com os valores de rc medidos em campo, apresentando um coeficiente de determinação de 0,62 para a área CP e 0,7 para a área SP. Nessa relação não foram incluídos os dados do mês de dezembro, devido ao erro experimental citado anteriormente. Nota-se que o modelo proposto apresentou um desempenho satisfatório, pois a estimativa de rc por meio de modelos é muito difícil devido sua variação ao longo do dia.

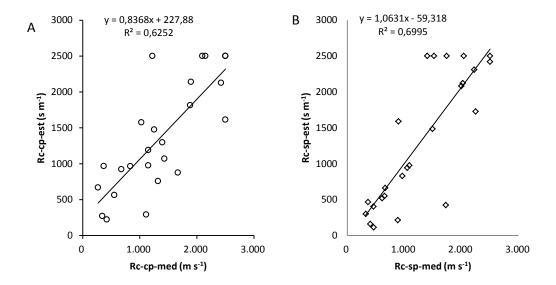
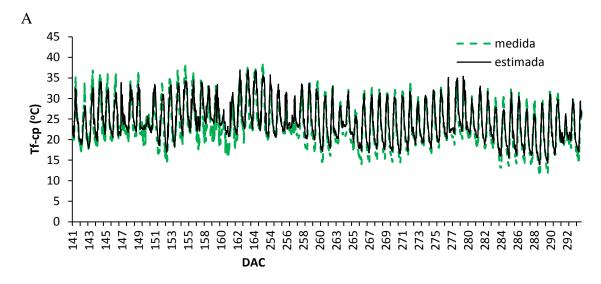


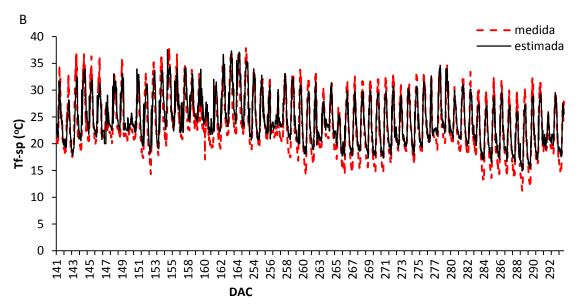
Figura 35. Relação entre a resistência estomática medida e a resistência estomática estimada de um canavial de um canavial manejado CP (A) e SP (B).

5.6.4. TEMPERATURA DO DOSSEL

Ao quantificar a temperatura da cobertura é possível se determinar a variável Δe do modelo de PM, por meio das equações 23, 24 e 25. Essa variável também possuiu papel relevante na quantificação do consumo hídrico das culturas, pois quando a transpiração é reduzida, ocorre incremento da temperatura da cobertura. O modelo utilizado para estimar a temperatura da folha se mostra eficiente, para ambos os tratamentos, apresentando alta relação entre os dados medidos e estimados, durante todo período experimental (Figura 36 A, B, C e D). Verifica-se que a relação apresentou um coeficiente de determinação de 0,84, tanto para

tratamento manejado CP, quanto para o SP (Figura 36 C e D). Esse modelo também foi utilizado por Marin et al., (2003b) para a estimativa da temperatura da cobertura de um gramado, e apresentou desempenho satisfatório, com coeficiente de determinação 0,79.





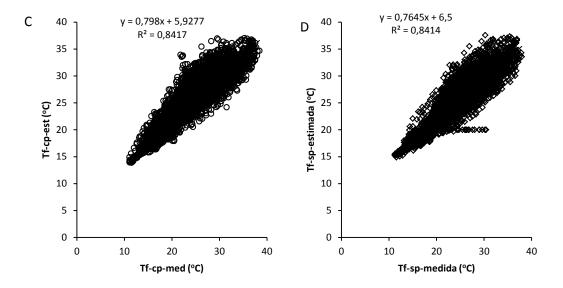


Figura 36. Variação da temperatura da cobertura da cana-de-açúcar estimada e media em relação aos DAC (A e B) e relação entre a temperatura medida (Tf-med) e estimada (Tf-est) (C e D), de um canavial manejado CP e SP.

5.7. EVAPORAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A evaporação do canavial manejado com palhada foi menor que a verificada na área SP (Figura 37). Nota-se ainda que quando ocorrem precipitações e irrigações, ocorre incremento nos valores de evaporação devido ao aumento no conteúdo de água no solo. Isso ocorre, pois de acordo com Allen et al., (1998) onde o intervalo entre chuvas e irrigação é grande e a "habilidade" do solo para transmitir água à superfície é pequena, a umidade na camada superficial do solo diminui e a superfície de solo seca. Sob estas circunstâncias de disponibilidade limitada de água, mostra uma influência que controla a evaporação do solo. Na ausência de qualquer suprimento de água para a superfície do solo, diminui a evaporação rapidamente e pode cessar quase completamente dentro de alguns dias.

Quando ocorreu precipitação, verificou-se que a evaporação na área manejada SP aumentou em uma taxa bem superior a verificada na área CP. Isso acontece, uma vez que de acordo com Peres et al., (2010) a presença da palhada na superfície do solo diminui os efeitos da radiação solar, que não se faz sentir com tanta intensidade quanto no tratamento SP, diminuindo substancialmente as perdas de água por evaporação. Para Allen et al., (1998) é necessário energia para mudar o estado das moléculas de água, de líquido para vapor (evaporação) e a radiação solar direta é a principal fonte, seguido de uma forma menor, a temperatura do ar

ambiente. A força motriz para remover o vapor de água da superfície evaporante está na diferença entre a pressão do vapor de água na superfície evaporante e do ar circunvizinho. Como o processo de evaporação é contínuo, o ar circunvizinho é gradualmente saturado e o processo reduzirá a velocidade e poderia parar se o ar úmido não for transferido à atmosfera. A substituição do ar saturado por ar mais seco é grandemente depende da velocidade do vento. Consequentemente, radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento são parâmetros climatológicos para serem considerados quando avaliamos o processo de evaporação.

Outro aspecto relevante foi que a partir dos 65 DAC as chuvas foram mais frequentes e a evaporação reduziu a cada mês, isso pode ter ocorrido devido ao aumento do IAF, reduzindo assim o efeito das variáveis meteorológicas sobre a evaporação do solo. De acordo com Allen et al., (1998) o grau de sombreamento do dossel da cultura, também afeta o processo de evaporação.

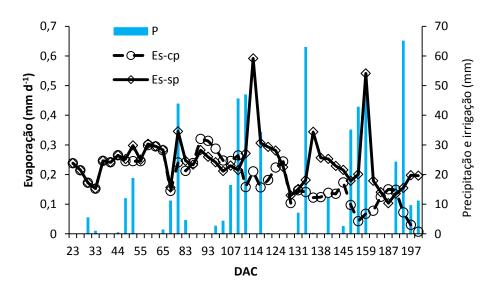


Figura 37. Precipitação e irrigação acumulada nos intervalos entre uma medida de umidade do solo e outra e evaporação de água no solo, de um canavial manejado com palha (Es-cp) e sem palha (Es-sp).

5.8. TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DA CULTURA BASEADA NO MODELO DE PENMAN-MONTHEITH

A determinação da transpiração máxima da cultura estimada por meio do modelo de PM, adaptado para a cana-de-açúcar, apresentou alta relação com a

transpiração medida com auxílio de sensores de fluxo de seiva. Porém, verifica-se que o modelo de PM superestimou a transpiração, quando comparada com à medida, na área manejada CP (Figura 38 C) e subestimou a transpiração na área manejada SP (Figura 38 D). Verifica-se ainda que a transpiração estimada por meio do modelo de PM variou de 0,6 a 6,3 mm d⁻¹e de 0,55 a 4,49 mmd⁻¹, com média de 4,17 e 2,13 mm d⁻¹ e a transpiração medida com sensores de fluxo de seiva variou de 0,6 a 4,7 mm d⁻¹ e de 0,55 a 3,67 mm d⁻¹ e apresentou uma média de transpiração para esse período de 3,45 e 2,39 mm d⁻¹, no tratamento CP e SP, respectivamente. Nassif et al., (2014), trabalhando com cana planta no município de Piracicaba e utilizando sensores de fluxo de seiva, encontraram resultados similares, uma transpiração variando de 3,15 a 5,98 mm d⁻¹.

A maior transpiração na área manejada CP pode ser devido ao maior IAF, Rnef e menor ra. Apesar de ocorrer, em alguns dias, uma superestimava na transpiração ao utilizar o modelo de PM para o tratamento CP, nota-se que ao adicionar os valores de evaporação de água no solo para determinação da evapotranspiração do canavial, os valores foram semelhantes aos medidos com o método da razão de Bowen (Figura 39A).

Chabot et al. (2005) medindo a transpiração da cana de açúcar (variedade CP 66-345) com sensores de fluxo de seiva em Gharb, área irrigada de Marrocos e com clima semiárido e constataram uma transpiração total de 80 mm num período de dez dias, ou seja, média de 8mm d⁻¹, para uma transpiração de referência de 5 mm d⁻¹, estimada baseada no modelo de PM. Os autores atribuíram essa transpiração alta, a possíveis erros, como ligados a medições de fluxo de seiva pelos sensores ou ligados a extrapolação a partir de alguns caules para toda a copa. A fonte de erro ligado a medições dos sensores pode ser reduzida ao utilizar um filtro, como o proposto por Van Bavel, (1999), associado a algumas práticas desejáveis no momento da instalação MARIN et al., (2008).

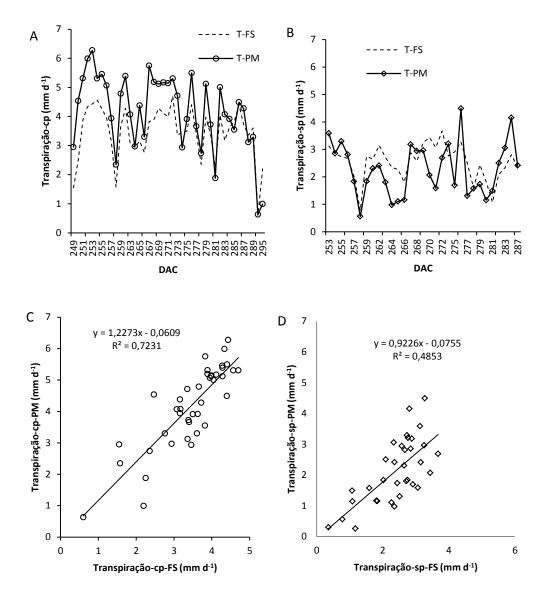


Figura 38. Variação da transpiração estimada com modelo de Monteith (1965) e medida com sensores de fluxo de seiva ao longo de vários dias após o corte (A e B) e a relação entre a transpiração estimada e medida (C e D) de um canavial manejado CP e SP.

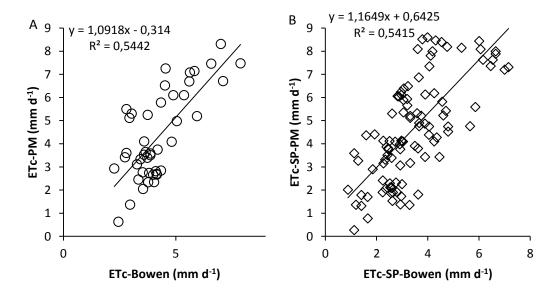
5.9. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA

Ao analisar a relação entre a evapotranspiração da cultura (ETc) estimada pelo método de PM e medida com o método da razão de Bowen e pelo balaço hídrico do solo, verifica-se que a relação apresentou coeficiente de determinação 0,544 e de 0,541 para o método da razão de Bowen e de 0,67 e 0,59, para os tratamentos CP e SP, respectivamente (Figura 39 A, B, C e D). Apesar do R² não ser elevado na relação com o método da razão de Bowen, os coeficientes angulares

(b) foram consistentes, de 1,09 para o tratamento CP e de 1,16 para o tratamento SP (Figura 39 A e B).

Outro fator interessante é que houve dias em que a ETc apresentou valores elevados, próximos a 8 mm d⁻¹. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al., (2013) em que no início do ciclo, a ETc era baixa, resultado do IAF reduzido e com o decorrer do ciclo, percebe-se que a ETc atinge valores máximos 6 a 8 mm dia⁻¹. Nassif et al., (2014), também constataram valores de ETc para a cana-deaçúcar na região de Piracicaba, acima de 7 mm d⁻¹ e atribuíram tal fato a às massas de ar seco na região, a temperatura elevada e radiação solar, que resulta em alta demanda atmosférica, que quando associado a disponibilidade de água no solo, favorece o incremento dos valores de ETc.

No presente estudo, a ETc média estimada com base no modelo de PM foi de 4,32 e 4,73 mm d⁻¹ e a ETc média medida com o método da razão de Bowen foi de 4,25 e 3,51mm d⁻¹ e com o balanço hídrico de água no solo foi de 2,60 e 2,77 mm d⁻¹, para os tratamentos CP e SP, respectivamente. Valores similares foram obtidos por Nassif (2015) trabalhando com a mesma variedade, porém com cana, constatou uma ETc média de 3,25 mm d⁻¹, por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003), constataram ETc média de 5,2 mm d⁻¹, utilizando o método da razão de Bowen, por Silva et al., (2012), que encontraram ETc média de 4,7 mm d⁻¹, na condição climática do semiárido brasileiro e por Nassif et al., (2014), que constataram uma ETc variando de 3,7 a 4,4 mm d⁻¹.



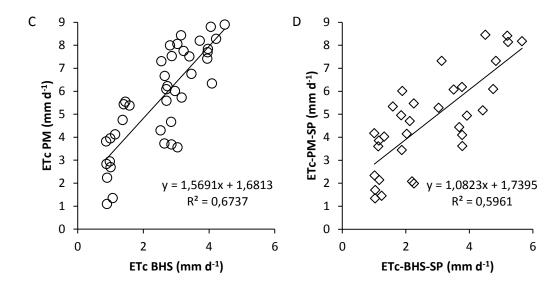


Figura 39. Relação entre a evapotranspiração da cultura estimada com base no modelo de PM e media com o método da razão de Bowen (A e B) e com o método do balanço hídrico do solo (C e D), de um canavial manejado CP e SP.

6. CONCLUSÕES

O cultivo de cana-de-açúcar utilizando os resíduos vegetais favorece o incremento da transpiração, da ETc e reduz a evaporação de água no solo.

A rc tende a ser menor na área CP e ela é mínima próximo às 14 horas, independente do manejo adotado. Nos estádios iniciais a ra é menor na área SP, devido ao maior perfilhamento e altura da cultura. Os submodelos utilizados de Rnef e Δe (com as estimativas de Tf), ra, rc e de evaporação utilizados como base na estimativa de ETc se mostraram eficiente e com potencial de uso na região sudeste do Brasil.

A palha influencia as variáveis biométricas da cultura, como perfilhamento, MFPA, MSPA, porém não se difere estatisticamente a produtividade final do canavial.

Independente do manejo adotado, aos 302 dias após o corte, o canavial apresentou ATR, POL e % de fibra ideal para a comercialização.

O teor de clorofila na área CP é superior ao manejado SP.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotrasnpiration information reporting: II. Recommended documentation. Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 98, p. 921-929, 2011.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Irrigation and drainage. Rome:FAO, 1998. 22p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALVES, E. L. Desenvolvimento de um sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida para a cultura da cana-de-açúcar a partir do fluxo de seiva. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, SP. 71p. 1999.
- ALVES. I.; PEREIRA, L.S. Modelling surface resistance from climatic variables? **Agricultural Water Management**, v.42, p.371-385, 2000.
- ARMOUR, J. D.; NELSON, P. N.; DANIELLS, J. W.; RASIAH, V.; INMAN-BAMBER, N. G. Nitrogen leaching from the root zone of sugarcane and bananas in the humid tropics of Australia. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 180, p. 68-78, 2013.
- ANGELOCCI, L.R. Estimativa da transpiração máxima de macieiras (*Malus* spp.) em pomares pelo modelo de Penman-Monteith. Tese de Livre-Docência USP/ESALQ. Piracicaba, 1997. 103p.
- ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R.; RIGHI, E.Z. Variação sazonal e ao longo do dia da condutância estomática e da transpiração de lima ácida 'Tahiti' em pomar irrigado em Piracicaba, SP. In: Congresso da sociedade botânica de São Paulo, v. 11. **Resumos**. Piracicaba: SBSP/ESALQ, P.110, 1998.
- ANGELOCCI, L. R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico. ESALQ, Piracicaba, 272p., 2002.

- ANGELOCCI, LUIZ R.; MARIN, FÁBIO R.; PILAU, FELIPE G.; RIGHI, EVANDRO Z.; FAVARIN, JOSÉ L.. Radiation balance of coffee hedgerows. **Revista**Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, p. 274-281, 2008.
- ARYA, PAUL S. Introduction to micrometeorology. Academic press, 2001.
- BAKER, J.M.; VAN BAVEL, C.H.M. Measurements of mass flow of water in stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.10, p.777-782, 1987.
- BERGAMASCHIA, H.; DALMAGOB, G. A.; BERGONCIC, J. I.; BIANCHID, C. A. M.; HECKLERE, B. M. M.; COMIRANE, F. Solar radiation intercepted by maize crops as function of soil tillage systems and water availabilities. In: **INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANISATION CONFERENCE**, ed.13., 2004, Brisbane. Proceedings... Brisbane: ASSSI/ IECA, 1 CD-ROM, 2004.
- BOIÇA, J. R.; ARLINDO, L.; LARA, F., M.; BELLODI, M. P. Influência de variedades de cana-de-açúcar, incorporadas em dieta artificial, no desenvolvimento de Diatraea saccharalis (Fabr.) e no seu parasitismo por Cotesia flavipes (Cam.). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 26, n. 3, p. 537-542, 1997.
- BOEHRINGER, DAVI. **Determinação da transpiração da cana-de-açúcar por métodos térmicos.** 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. 97p. 2010.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction to environmental biophysics**, New York: Springer, 1998. 283p.
- CAMPBELL, G.S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. **Agric. Forest Meteorol**. v. 36, p.317-321. 1986.
- CARVALHO, G.J. **Análise da potencialidade autoalelopática de restos culturais da colheita de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Lavras, Lavras. 72p., 1996.

- CENSO VARIETAL 2015 RIDESA. Disponível em: < http://www.pmgca.ufscar.br/arquivos/downloads/palestra-ufscar-reunioes-regionais.pdf > Acessado em: 15/12/2015.
- CHABOT, R.; BOUARFA, S.; ZIMMER, D.; CHAUMONT, C.; MOREAU, S. Evaluation of the sap flow determined with a heat balance method to measure.

 Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 75, n. 1, p. 10-24, 2005.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto/2013.Brasília: **Conab**, 2015.
- CORREIA, N. M.; DURIGAN, J. C. Emergência de plantas daninhas em solo coberto com palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 22, n. 1, p. 11-17, 2004.
- COSTA, M. C. G.; MAZZA, J. A.; VITTI, G. C. Variedades de cana-de-açúcar vs. adaptação ao solo vs. renovação do sistema radicular. (2012). Disponível em:

 < http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/
 926048f0196c9d4285256983005c64de/4c603bf804ee5a38032570d8004c0634/\$f
 ile/anais%20mirian%20cristina%20gomes%20costa.pdf> acessado em:
 15/10/2015.
- DAAMEN, C.C.; DUGAS, W. A.; PRENDERGAST, P.T.; JUDD, M.J.; MCNAUGHTON, K.G. Energy flux measurements in a sheltered lemon orchard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.93, p.171-183, 1999.
- DALMAGO, G. A. Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional. 2004. (Doutorado em Fitotecnia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. p. 245, 2004.
- DELGADO, A.A. Os efeitos da queima dos canaviais. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.3, n.1, p.42-45, 1995.

- DINARDO-MIRANDA, L.L. Pragas. In: DINARDOMIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, p.349-404, 2008.
- DOORENBOS J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements, Rome: FAO, 1977. 179p. Irrigation and Drainage, Paper 24.
- DURIGAN, Julio Cezar; TIMOSSI, P. C.; LEITE, G. J. Controle químico da tiririca (Cyperus rotundus), com e sem cobertura do solo pela palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 22, n. 1, p. 127-135, 2004.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2013.
- EMEKLI, Y.; BASTUG, R.; BUYUKTAS, D.; EMEKLI, N.Y. Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.90, p.205-212, 2007.
- ESTEVES, A. A. **Fisiologia de la caña de azucar**. In: OSORIO, C.E. B. Ed. El cultivo de la caña de azucar. Cali, P. p.27-41, 1986.
- FELIPE, M. G. A. **Bioetanol de Cana-de-Açúcar**: P&D para Produtividade Sustentabilidade; Cortez, L. A. B., ed.; Edgard Blücher Ltda: São Paulo, cap. 12 parte 4, 2010.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: Um programa para análise e ensino de estatística. **Revista Symposium**, v. 6, n.1, p. 36-41, 2008.
- FLORENTINO, H. O.; MORENO, E. V.; SARTORI, M. M. P. Multiobjective optimization of economic balances of sugarcane harvest biomass. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 5, p. 561-564, 2008.
- FORTES, C. Produtividade de cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e da decomposição da palhada em ciclos consecutivos. 2010.

- Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- FRANCO, E. M. Monitoramento da dinâmica da água e solutos em um perfil de solo, sob sistema de fertirrigação por gotejamento, utilizando sonda de capacitância e extratores de solução. 2009. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- GALLO, D. O.; NAKANO, S. S.; NETO, R. P. L.; CARVALHO, G. C.; BATISTA, E.; BERTI FILHO, J. R. P. PARRA, R. A.; ZUCCHI, S. B.; ALVES, J. D. V. Manual de entomologia agrícola. São Paulo, Agronômica Ceres, 649p. 1988.
- GALVAO, R., GOZER, I., ORTIZ, F., & DAHMER, V. Concentração na agroindústria canavieira paranaense pós desregulamentação setorial: uma análise aplicada de suas Mesorregiões. In 47º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Porto Alegre-RS. 2009.
- GARDNER, WALTER H. E KLUTE, A. Water content. Methods of soil analysis. Part 1. **Physical and mineralogical methods**, v.1 p. 493-544, 1986.
- GENTIL, M. S. Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de Eucalyptus aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia. 2010. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- GONTIA, N.K.; TIWARI, K.N. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.95, p.1.144-1.152, 2008.
- GREEN S.R., M.C. NAUGHTON K.G.; GREER, D.H.; MCLEOD, D.J. Meaurement of increased PAR and net all-wave radiation absorption by an apple tree caused by applying a reflective ground covering. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 76, p.163-183, 1995.

- GREEN, S.R. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.64, p.201-221, 1993.
- GUAGLIUMI, P. **Pragas da cana-de-açúcar no nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto do Açúcar e do Álcool. Col. Canav., 622p., 1972/73.
- HECKLER, J. C.; SALTON J. C. Palha: fundamento do sistema plantio direto.

 Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. v. 7, 26 p. (Coleção Sistema Plantio Direto) Disponível em:http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/ 247967/1 /COL20027.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2015.
- HOUSHMANDFAR, Alireza et al. Modelling stomatal conductance of wheat: An assessment of response relationships under elevated CO 2. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214, p. 117-123, 2015.
- HUERTA, A. S. Comparación de métodos de laboratório y de campo para el área del cafeto. **Cenicafé. Chinchiná**, v.13, n.1, p.33-42. 1962.
- INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v. 89, n. 1, p. 107-122, 2004.
- 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.; McGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane basedon long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 83 n. 1, p. 125-138, 2003.
- IVO, W. M. P. M.; ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D.; BARBOSA, G. V. S.; VASCONCELOS, J. N. Impulsionando a produção e a produtividade da canadeaçúcar. In: ALBUQUERQUE, A. C. S. & SILVA, A. G. Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008, v.1, 1337 p.

- JARVIS, P.G. Interpretation of the variation in the leaf water potential and stomatal condutance found in canopies in the field. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 273, p. 593-610, 1976.
- JENDIROBA, E. Questões ambientais no manejo da agroindústria canavieira. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA E.; NOBREGA J. C. M (Org.). Atualizações em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 2006. p.345-357.
- JONES, H.G. **Plants and microclimate** a quantitative approach to environmental plant physiology. New York. Cambridge University Press, 428p. 1992.
- LARCHER, W. Ecofisiologia vegetal. São Carlos: RiMa, 550 p., 2006.
- LEME FILHO, J. R. A.. Desenvolvimento da cana-de-açúcar (Saccharum spp.) sob diferentes formas de colheita e de manejo do palhiço. 2009. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- LEME, R. M. Álcool combustível derivado da cana-de-açúcar e o desenvolvimento sustentável. **Procedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural**, 2004.
- LEUZINGER, S.; VOGT, R.; KÖRNER, C. Tree surface temperature in an urban environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.150, p.56-62, 2010.
- Libardi, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 1. ed. Piracicaba: Departamento de Física e Meteorologia (ESALQ/USP). 497p., 1995.
- LINNAEUS, C. **Species Plantarum**. Impensis Laurentii Salvii, Holmiae, v.1, 572 pp., 1753.
- MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao

- déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional** das plantas: princípios e aplicações. 2. Ed. Piracicaba: POTAFÓS, 319 p., 1997.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 638p. 2006.
- MARENCO, R.A.; LOPES, N.F. **Fisiologia vegetal:** fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral. Viçosa: Artmed, 2005. 451 p.
- MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L.R.; RIGHI, E.Z. Modelo simplificado para estimativa da resistência foliar à difusão de vapor de árvores de lima ácida Tahiti. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n.2, p. 227-233, 2001a.
- MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; COELHO FILHO, M.A.; VILLA NOVA, N.A. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 839-844, 2001b.
- MARIN, F. R., ANGELOCCI, L. R., E VILLA NOVA, N. A. Estimativa da transpiração máxima de lima ácida, cv. Tahiti, pelo modelo de Penman-Monteith. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n.2, p. 237-243, 2003a.
- MARIN, F. R.; RIGHI, E. Z.; SANTIAGO, A. V.; SENTELHAS, P. C.; MAGGIOTO, S. R.; LYRA, G. B. . Estimativa da temperatura da superfície e da evapotranspiração em gramado com um método iterativo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria/RS, v. 11, n.2, p. 221-228, 2003b.
- MARIN, F. (2003). **Evapotranspiração e transpiração máxima de café adensado**. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo p.118, 2003c.

- MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; RIGHI, E.Z.; SENTELHAS, P.C. Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in southern Brazil. **Experimental Agri. crop**, Cambridge, v.41, n.2, p.187-197, 2005.
- MARIN, F. R., PELLEGRINO, G. Q., ASSAD, E. D., PINTO, H. S., & ZULLO JÚNIOR, J. (2009). Agrometeorologia da cana-de-açúcar. **Agrometeorologia** dos cultivos-Levantamento Sistemático de Informações Agrometeorológicas e Fitotécnicas. Brasília: INMET, v.1, p.109-130, 2009.
- MARIN, F.R.; RIBEIRO, R.V.; ANGELOCCI, L.R.; RIGHI, E.Z. Fluxo de seiva pelo método de balanço de calor: base teórica, qualidade das medidas e aspectos práticos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1. p. 1-12, 2008.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola** (USP. Impresso), v. 71, p. 1-16, 2014.
- MARIN, F. R., ANGELOCCI, L. R., NASSIF, D. S., COSTA, L. G., VIANNA, M. S., & CARVALHO, K. S. Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. **Agricultural Water Management**, v.163, p.139-145, 2016.
- MENDONZA, H. N. S.; Lima, E., Anjos, L. H. C., Silva, L. A., Ceddia, M. B., Antunes, M. V. M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 24, n. 1, p. 201-207, 2000.
- MONTEITH, J.L. EVAPORATION AND ENVIRONMENt. Symposium of Society of Experimental Biology. v.19, p.205-234, 1965.
- MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e morfologia da cana-deaçúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Prol Editora Gráfica, p. 11-18, 2006.

- NASSIF, D.S.P.; MARIN, FÁBIO R.; COSTA, L. G. Padrões mínimos para coleta de dados experimentais para estudos sobre crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Campinas: **Embrapa**, (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento), 2013.
- NASSIF, D. S. P. Evapotranspiração, transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. p.123, 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, 2014.
- NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. Academic press, 661p., 1999.
- NÚÑEZ, C. M., VARAS, E. A., & MEZA, F. J. Modelling soil heat flux. **Theoretical** and applied climatology, v.100 n.3-4, p. 251-260, 2010.
- OLIVARES, F. L. Taxonomia, ecologia e mecanismos envolvidos na infecção e colonização de plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.* Híbrido) por bactérias endofíticas do gênero Herbaspirillum. Tese Doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 344p., 1997.
- OLIVEIRA, E. L.; ANDRADE, L. A. B.; FARIA, M. A.; EVANGELISTA, A. W. P.; MORAIS, A. R.. Uso da vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1398-1403, 2009.
- OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; PENATTI, C. P.; PICCOLO, M. D. C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2359-2362, 1999.
- OLIVEIRA FILHO, F. X.; MIRANDA, N. D. O.; MEDEIROS, J. F.; DA SILVA, P. C.; MESQUITA, F. O., COSTA, T. K. Zona de manejo para preparo do solo na cultura

- da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19 n.2, p.186-193, 2015.
- OLIVIER, F.C; SINGELS, A. The effect of crop residue layers on evapotranspiration, growth and yield of irrigated sugarcane. **Water S. A**, Pretoria, v. 38, n. 1, Jan. 2012.
- OTTO, R.; TRIVELIN, P. C. O., FRANCO, H. C. J., FARONI, C. E., & VITTI, A. C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 601-611, 2009.
- PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 875-886, 2010.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97, p. 141-150, 1999.
- POLIDORO, J. C. O molibdênio na nutrição nitrogenada e na fixação biológica de nitrogênio atmosférico associada à cultura de cana-de-açúcar. Tese Doutorado Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 209p., 2001.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Manole, 2004.
- RESENDE, A. S. (2000). A fixação biológica de nitrogênio (FBN) como suporte da produtividade e fertilidade nitrogenada dos solos na cultura de cana-deaçúcar: uso de adubo verde. Dissertação de Mestrado Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 145p. 2000.
- REZENDE, C. G. B. Fosfato natural na adubação do capim piatã em latossolo vermelho do cerrado. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Mato Grosso, 80p. 2013.

- RIGHI, E.Z. Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada. 2004. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 151p. 2004.
- RIPOLI, M. L. C.; GAMERO, C. A. Palhiço de cana-de-açúcar: ensaio padronizado de recolhimento por enfardamento cilíndrico. **Energia na Agricultura**, v. 22, n. 1, p. 75-93, 2007.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros Marques Editoração Eletrônica, 302 p. 2004.
- ROBERTS, J.; NAYAMUTH, R.A.; BATCHELOR, C.H.; SOOPRAMANIEN, G.C. Plantwater relations of sugarcane (Saccharum officinarum L.) under a range of irrigated treatments. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 17, p. 95-115, 1990.
- ROBERTSON, M. J.; BONNETT, G. D.; HUGHES, R. M.; MUCHOW, R. C.; CAMPBELL, J. A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Functional Plant Biology**, v. 25, n. 7, p. 819-828, 1998.
- ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. MICROCLIMATE: **The Biologicl Environment**. Wiley, USA, 495 pp. 1983.
- ROSSETTO, R. Arvore do conhecimento Cana-de-açúcar Diagnose Foliar. **Embrapa**. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONT000fkch7tf302wyiv80sq98yqk1vc 13r. html>. Acesso em: 10/07/2016.
- SAKURATANI, T.; ABE, J. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plants and its application to sugarcane plants. **Japan Agricultural Research Quarterly**, Tsukuba, v.19, n.2, p.92-97, 1985.

- SANTOS, R.Z.; BOUHID, A.R.G. Relações energéticas e aerodinâmicas em uma cultura de feijão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 11-18, 1999.
- SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. D.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.
- SCAPARI, M. S.; BEUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação-IAC, Cap. 2, p. 47-56, 2008.
- SENTEK. Calibration of Sentek Pty Ltd soil moisture sensors. **Stepney: Sentek Pty Ltd**, 2001.
- SENTEK. DIVINER 2000: user guide version 1.21. Stepney: Sentek Pty Ltd, 2000.
- SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. Sazonalidade do Controle de Evapotranspiração pela Cana-de-Açúcar Irrigada e Características Aerodinâmicas da Cultura no Semiárido brasileiro (Seasonal Evapotranspiration Control by Irrigated Sugarcane). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 621-634, 2013.
- SMITH, M. Report on expert consultation on procedures for revision of FAO methodologies for crop water requirements. FAO, 45p. 1991.
- SOUSA, G. B. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente com palha de cana-de-açúcar. 2011.
- SOUZA, E.F.; BERNARDO, S.; CARVALHO, J.A. Função de produção da cana-deaçúcar em relação à água para três cultivares, em Campos dos Goytacazes, RJ. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 19, n. 1, p. 28- 42, 1999.

- SOUZA, Z. M. D., PAIXÃO, A. C. S., PRADO, R. D. M., CESARIN, L. G., SOUZA, S. R. D., & MONTANARI, R. Produtividade agrícola de variedades de cana-deaçúcar e incidência de broca-comum e cigarrinha-da-raiz em canavial colhido sem queima. **Bragantia**, v.1, p.413-419, 2008.
- SOUZA, Z. M., DE MELLO PRADO, R., PAIXÃO, A. C. S., CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005.
- SOUSA, G. B., MARTINS FILHO, M. V., & MATIAS, S. S. Perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba-SP. **Engenharia Agrícola**, p.490-500, 2012.
- STANHILL, G. A simple instrument for field measurement of turbulent diffusion flux. **Journal of Applied Meteorology**, v.8, p.509-513, 1969.
- SZEICS, G.; ENDRODI, G.; TAJCHMAN, S. Aerodynamic and surface factors in evaporation. **Water Resources Research**, v.5, p.380-394, 1969.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. **Artmed, Porto Alegre.** Ed.4, 379p. 2009.
- THOM, A. S.; OLIVER, H. R. On Penman's equation for estimating regional evaporation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 436, p. 345-357, 1977.
- THORPE, M.R.; WARRIT, B.; LANDSBERG, J.J. Responses of apple leaf stomata: a model for single leaves and a whole tree. **Plant, Cell and Environment**, v.3, p. 23-27, 1980.
- TRIVELIN, P. C. O.; VICTORIA, R. L.; RODRIGUES, J. C. S. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e uréia-15N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, p. 1375-1385, 1995.

- URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; OLIVEIRA, O. D.; LIMA, E.; GUIMARÃES, D. H. A importância de não queimar a palha na cultura de cana-de-açúcar. **EMBRAPA-CNPBS**. Comunicado técnico. nº 5, p.1-6, 1991.
- VAN BAVEL, C.H.M. **Flow32TM Installation and operation manual**. Houston: Dynamax Inc., 1999, 178p.
- VAN KEULEN, H.; SELIGMAN, N. G., Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring what crop. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 310 p., 1987.
- VASCONCELOS, A. C. M. Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 140 p., 2002.
- VERMA, S.B.; ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B.L.; BARADAS, M.W. Resistance-energy balance model for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 776-782, 1976.
- VERTUAN, A. C. Fluxos de transpiração de três variedades de cana-de-açúcar sob altas condições de demanda hídrica. 2003. Dissertação de mestrado. Universidade de Campinas. 112p., 2003.
- VIANNA, M. S.; CARVALHO, K. S.; PILAR, R.; PEREIRA, P.; PUTTI, L.; MARIN, F. R. . INFLUÊNCIA DA COBERTURA DA PALHA NA TEMPERATURA DO SOLO E NO PERFILHAMENTO DE UM CANAVIAL IRRIGADO. In: XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2015, Lavras. O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros, 2015.
- WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications. Amsterdam: Elsevier, 449p. 2006.

- 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.
- WILLMOTT, C. F. On the validation of models. **Physical Geography**, Kelowna, v.2, n.2, p.184-194, 1981.