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

**Armazenamento de água no solo de uma cultura de soja medido por
tensiômetros de polímero e estimado por diferentes métodos
agrometeorológicos**

Ana Paula Schwantes

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2013**

Ana Paula Schwantes
Engenheiro Agrônomo

**Armazenamento de água no solo de uma cultura de soja medido por tensiômetros de
polímero e estimado por diferentes métodos agrometeorológicos**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **KLAUS REICHARDT**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2013**

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

Schwantes, Ana Paula

Armazenamento de água no solo de uma cultura de soja medido por tensiômetros de polímero e estimado por diferentes métodos agrometeorológicos / Ana Paula Schwantes. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.

78 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Água no solo - Armazenamento 2. Balanço hídrico 3. Deficiência hídrica
4. Evapotranspiração 5. Soja - Produtividade I. Título

CDD 633.34
S398a

**Aos meus pais Jair e Noeli
e à minha avó Walli Soder Schwantes
(*in memorian*), dedico.**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Jair e Noeli e à minha irmã Fernanda, pelo exemplo de trabalho e por nunca me deixarem desistir. Ao Felipe por passar comigo esta etapa importante da minha vida, mais uma vez. Aos demais familiares, pelo carinho e pelas ligações que ajudam a diminuir a saudade.

À Universidade de São Paulo (Esalq/USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao meu orientador professor Dr. Klaus Reichardt, pela orientação, disponibilidade nos inúmeros momentos de dúvida e por me incentivar frente às dificuldades do projeto.

Ao professor Dr. Durval Dourado Neto, pela amizade e esclarecimentos ao longo do trabalho, e pelo aprendizado participando de algumas atividades do Gfasp. Agradeço às amigas Karla e Maíra, aos queridos estagiários e aos demais integrantes do grupo pelo aprendizado e momentos de descontração.

Ao professor Dr. Quirijn de Jong Van Lier, Marcos, Angélica e Chiquinho pelo auxílio na instalação e manutenção dos tensiômetros e pelo auxílio com minhas dúvidas.

Ao professor Dr. Paulo Cesar Sentelhas pelas valiosas contribuições neste trabalho e por seu entusiasmo como educador.

Aos professores Fábio Ricardo Marin, Pedro Jacob Christoffoleti, José Laércio Favarin e Sônia Maria de Stefano Piedade pela contribuição na minha formação acadêmica.

Aos amigos Marcela, Adilson, Rogério, Leo, Fabrícia, Bia, Bruna, Daniela, Luís, Dri, Ana, Bruno, Clovis, Kélin, Tiago, Silas, Rafa, Jaque e Txarli-Braun por fazerem meus dias mais leves e engraçados.

Ao Florian pelo auxílio com as dúvidas de informática.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia Luciane, e à Bete e à Solizete pelo auxílio em todos os momentos de dúvida e pela amizade.

A todos os funcionários da Escola que contribuíram para a realização deste projeto, especialmente à equipe do Departamento de Produção Vegetal e aos funcionários da Biblioteca Central.

“Um homem não deveria nunca parar de aprender, nem no seu último dia.”

Moses Maimonides

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 A cultura de soja	23
2.2 Tensiômetros de polímero	23
2.3 Armazenamento de água no solo	24
2.4 Evapotranspiração	26
2.5 Balanço hídrico e armazenamento de água	27
2.6 Produtividade deplecionada por água	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Caracterização do local do experimento	31
3.2 Instalação e condução do experimento	32
3.3 Instalação dos tensiômetros de polímero	33
3.4 Estimativa do armazenamento em função do potencial de água no solo	33
3.5 Balanço hídrico	35
3.5.1 Estimativa da evapotranspiração de referência	35
3.5.1.1 Método de Thornthwaite	35
3.5.1.2 Método de Penman	36
3.5.1.3 Método de Penman e Monteith	37
3.5.2 Balanço hídrico de cultura e armazenamento de água no solo	38
3.5.2.1 Método de Thornthwaite e Mather	38
3.5.2.2 Método de Rijtema e Aboukhaled	39
3.5.2.2 Método Cossenooidal	40
3.6 Produtividade deplecionada por água	40
3.7 Análise estatística	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Análise do potencial matricial do solo medido com os tensiômetros de polímero	43
4.2 Análise do conteúdo volumétrico de água no solo	45

4.3 Análise de comparação entre os métodos de cálculo do balanço hídrico climatológico ...	47
4.4 Análise de comparação entre os métodos de cálculo do balanço hídrico climatológico e o armazenamento medido pelos tensiômetros de polímero	52
4.5 Análise de comparação entre os métodos de Thornthwaite e Mather com a CAD calculada com 0,6, 1,0 e 3,33 m H ₂ O e o armazenamento medido pelos tensiômetros de polímero.....	56
4.6 Produtividade deplecionada por água	58
5 CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS.....	63
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	67
APÊNDICE.....	69
ANEXO.....	73

RESUMO

Armazenamento de água no solo de uma cultura de soja medido por tensiômetros de polímero e estimado por diferentes métodos agrometeorológicos

O conhecimento do armazenamento de água pelo solo (ARM) é importante por tratar-se de uma cultura de grande interesse agrônomo. Os tensiômetros de polímero são novos dispositivos capazes de verificar a tensão de água no solo em situações de solo bem seco e realizam medidas do potencial matricial do solo que podem ser utilizadas para o cálculo de ARM. O presente trabalho tem por objetivos: (i) estimar o armazenamento de água no solo através dos métodos de estimativa de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (M), Rijtema e Aboukhaled (R) e Cossenoidal (C), combinados com a evapotranspiração de cultura estimada pelos métodos de Thornthwaite, Penman e Penman-Monteith, a fim de compará-los com valores de ARM medidos com tensiômetros de polímeros; (ii) estimar a produtividade deplecionada por água e comparar com os dados observados em um experimento de campo com uma cultura da soja. O experimento foi conduzido no município de Piracicaba, SP, com tensiômetros instalados a 0,05, 0,15 e 0,30 m de profundidade, representando as camadas de 0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, respectivamente. De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que: (i) o método M subestima a evapotranspiração atual (*ETa*). Consequentemente, superestima o déficit hídrico e subestima *S* pois assume que (a) *ETa* só é igual à evapotranspiração potencial quando ARM é igual à capacidade de armazenamento do solo (*CAD*); (b) M assume aumento linear entre ARM nulo até a *CAD*; (ii) os métodos R e C apresentam estimativas de *ETa* equivalentes; consequentemente, também apresentam estimativas equivalentes de ARM e déficit hídrico. Porém, enquanto o método R assume aumento linear de *ETa* na faixa de ARM nulo até ARM crítico, o método C assume variação sigmoideal (o que condiz mais com a realidade); (iii) o método de estimativa de evapotranspiração que melhor ajustou-se aos dados reais foi o de Penman e Monteith. Porém, quando apenas houver dados de temperatura disponíveis, recomenda-se a utilização do método de Thornthwaite; (iv) a capacidade de campo pode ser determinada experimentalmente com base no valor médio do potencial matricial ou umidade durante o período chuvoso; (v) para efeito de realização de balanço hídrico, a *CAD* pode ser determinada com base na determinação prévia do ponto de murcha permanente (teor de água correspondente ao potencial matricial de -15 atm), profundidade efetiva do sistema radicular (profundidade do solo que contribui com 95% da evapotranspiração), com o coeficiente angular da reta igual a um; e (vi) a produtividade deplecionada por água da soja foi de 4279,7 kg ha⁻¹, com uma quebra de 55% em relação à produtividade potencial.

Palavras-chave: Evapotranspiração; Armazenamento de água; Deficiência hídrica; Produtividade deplecionada por água

ABSTRACT

Soil water storage of a soybean crop measured by polymer tensiometers and estimated by different agrometeorological methods

The knowledge about soil water storage (ARM) is essential in agriculture mainly for crops of great agronomic importance. Polymer tensiometers are new instruments capable of measuring soil water tension in very dry soil conditions and perform measurements of soil matrix potential that can be use to calculate ARM. The aims of this study were: (i) to estimate ARM by the water balance estimation methods of Thornthwaite and Mather (M), Rijtema and Aboukhaled (R), and Cossenoidal (C), combined with crop evapotranspiration estimated by Thornthwaite, Penman and Penman-Monteith, in order to compare them with ARM values calculated from polymer tensiometer data; (ii) to estimate the water-depleted productivity of the soybean and compare it with observed data in a field experiment with a soybean crop. The experiment was conducted in Piracicaba, São Paulo State, Brazil, with tensiometers installed at 0.05; 0.15 and 0.3 m depths, representing 0-0.1; 0.1-0.2 and 0.2-0.4 m soil layers. The results show that: (i) the M method underestimates the actual evapotranspiration (ETa). Consequently, it overestimates the hydric deficit and underestimates ARM because it assumes that (a) ETa is only equal to the potential evapotranspiration when ARM is equal to the available soil water storage capacity (AWC); (b) M assumes a linear increase from null ARM until AWC; (ii) the R and C methods provide equivalent estimates of Eta; consequently, they also present equivalent estimates of ARM and hydric deficit. However, while R assumes a linear increase of Eta from null ARM until a critic ARM, C assumes a sigmoidal variation (which agrees more with reality); (iii) the best method of evapotranspiration estimative was M. However, when only temperature data is available, it is recommended to use the Thornthwaite method; (iv) the field capacity can be determined experimentally based on the average matric potential and moisture during the rainy season; (v) for calculating water balances, AWC can be determined based on the previous determination of the permanent wilting point (water content corresponding to the matric potential of -15 atm), effective depth of the root system (soil depth whichs contributes with 95% of the evapotranspiration), with the slope equal to one; and (iii) the water-depleted productivity of the soybeans was 4279.7 kg ha⁻¹, 55% less than the potential productivity.

Keywords: Evapotranspiration; Water storage; Water deficiency; Water-depleted productivity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tensiômetro de polímero. Fonte: Durigon; de Jong Van Lier (2011).....	24
Figura 2 - Vista geral da área experimental com a cultura de soja. Piracicaba, 2012	31
Figura 3 - Valores médios mensais de precipitação e temperatura (média, máxima e mínima), medidas em uma estação meteorológica convencional, no período de 1917 a setembro de 2012	32
Figura 4 - Precipitação e temperatura (média, máxima e mínima), medidas em uma estação meteorológica automática, no período de 05 de janeiro a 10 de maio de 2012	32
Figura 5 - Curva de retenção de água média referente à 250 pontos de amostragem. Fonte: Moraes (1991).....	34
Figura 6 - Potencial matricial médio do solo (h, em m) medido com tensiômetros de polímero e precipitação pluviométrica (mm)	44
Figura 7 - Conteúdo volumétrico de água nas camadas de 0-0,1 m; 0,1-0,2 m e 0,2-0,4 m e média das três camadas	46
Figura 8 - Armazenamento de água (mm) medido pelos tensiômetros e estimado pelo método de Thornthwaite e Mather com a evapotranspiração de cultura estimada pelos métodos de Thornthwaite, Penman e Penman e Monteith.....	47
Figura 9 - Armazenamento de água (mm) medido pelos tensiômetros e estimado pelo método de Rijtema e Aboukhaled com a evapotranspiração de cultura estimada pelos métodos de Thornthwaite, Penman e Penman e Monteith.....	47
Figura 10 - Armazenamento de água (mm) medido pelos tensiômetros e estimado pelo método Cossenoidal com a evapotranspiração de cultura estimada pelos métodos de Thornthwaite, Penman e Penman-Monteith.....	48
Figura 11 - Análise de regressão entre os armazenamentos de água estimados pelos métodos de balanço hídrico de: (a) Thornthwaite e Mather (M) e Rijtema e Aboukhaled (R);	

(b) Thornthwaite e Mather (M) e Cossenoidal (C); e (c) Rijtema e Aboukhaled (R) e Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Thornthwaite..... 49

Figura 12 - Análise de regressão entre os armazenamentos de água estimados pelos métodos de balanço hídrico de: (a) Thornthwaite e Mather (M) e Rijtema e Aboukhaled (R); (b) Thornthwaite e Mather (M) e Cossenoidal (C); e (c) Rijtema e Aboukhaled (R) e Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Penman 50

Figura 13 - Análise de regressão entre os armazenamentos de água estimados pelos métodos de balanço hídrico de: (a) Thornthwaite e Mather (M) e Rijtema e Aboukhaled (R); (b) Thornthwaite e Mather (M) e Cossenoidal (C); e (c) Rijtema e Aboukhaled (R) e Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Penman e Monteith... 51

Figura 14 - Análise de regressão entre o armazenamento de água medido pelos tensiômetros de polímero (A) e estimado pelos métodos de balanço hídrico (a) Thornthwaite e Mather (M); (b) Rijtema e Aboukhaled (R); e (c) Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Thornthwaite..... 53

Figura 15 - Análise de regressão entre o armazenamento de água medido pelos tensiômetros de polímero (A) e estimado pelos métodos de balanço hídrico (a) Thornthwaite e Mather (M); (b) Rijtema e Aboukhaled (R); e (c) Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Penman 54

Figura 16 - Análise de regressão entre o armazenamento de água medido pelos tensiômetros de polímero (A) e estimado pelos métodos de balanço hídrico (a) Thornthwaite e Mather (M); (b) Rijtema e Aboukhaled (R); e (c) Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Penman e Monteith..... 55

Figura 17 - Análise de regressão entre o armazenamento de água medido pelos tensiômetros de polímero (A) com o armazenamento de água estimado pelo métodos de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (M) com a CAD de 45,8 mm (0,6 m H₂O, a); de 37,1 mm (1,0 m H₂O, b); de 19,7 mm (3,33 m H₂O, c); e de 28,5 mm (1,71 m H₂O, d)..... 57

Figura 18 - Produtividade potencial (Y_o, kg ha⁻¹), produtividade deplecionada por água (Y_r, kg ha⁻¹) e produtividade observada (Y_c, kg ha⁻¹) 58

Figura 19 - Tensiômetro de polímero com disco de cerâmica contendo α -Al₂O₃ (1), uma membrana de γ -Al₂O₃ (2), uma cápsula de aço inoxidável (3), uma câmara de polímero (4), um transdutor de pressão (5), e um anel sintético (6). . Fonte: Bakker et al. (2007) 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Descrição dos produtos aplicados na cultura de soja no período experimental para manejo de pragas e doenças	33
Tabela 2 - Fator de correção da evapotranspiração em função do fotoperíodo e do número de dias do mês, para latitude 22° Sul	36
Tabela 3 - Valores médios diários observados de temperatura média do ar (Tmed, °C), máxima (Tmax, °C) e mínima (Tmin, °C), umidade relativa média do ar (UR, %), velocidade do vento medida a 2 m da superfície do solo (U_2 , m s ⁻¹) e saldo de radiação (MJ m ⁻² d ⁻¹), durante o período de 05/01/2012 a 10/05/2012.....	75

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é muito importante mundialmente em função de seu uso na alimentação animal, como principal fonte de proteína e óleo, além de constituir a matéria-prima básica para diversos setores da indústria. Muitas pesquisas têm demonstrado o seu efeito protetor na saúde humana, melhorando as taxas de colesterol, diabetes e obesidade nas populações que fazem uso contínuo desta oleaginosa (USDA, 2012). No Brasil, a soja é um dos grãos mais produzidos, alcançando 66,38 milhões de toneladas na safra 2011/2012, com uma tendência de crescimento de até 25 milhões de toneladas (CONAB, 2012ab). Este aumento deve-se principalmente à alta tecnologia que os produtores vêm adotando em suas áreas de produção, como fertilizantes e insumos cada vez mais eficientes.

Os tensiômetros de polímero são dispositivos novos, capazes de medir a tensão de água no solo em situações de solo bem mais seco do que os tensiômetros comuns (BAKKER et al., 2007; VAN DER PLOEG et al., 2008), e representam uma alternativa eficiente para a realização de medidas do potencial matricial do solo. No país, existe relato de uso deste equipamento em Durigon et al. (2011) e Durigon e De Jong van Lier (2011) em condição de laboratório, mas a literatura ainda não apresenta resultados para condições de campo.

O conhecimento do armazenamento de água pelo solo é importante ao tratar-se da soja, uma cultura de grande interesse agrônômico. O cálculo do armazenamento a partir do conteúdo volumétrico de água no solo permite que a medida de água seja dada em mm (REICHARDT; TIMM, 2012), assim como os valores de precipitação e armazenamento em um balanço hídrico. Isso se torna possível quando o potencial matricial pode ser facilmente medido no campo.

A ocorrência simultânea da evaporação e da transpiração é chamada de evapotranspiração, e é dependente da vegetação, da demanda atmosférica, da disponibilidade de energia e do suprimento de água do solo para as plantas (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; REICHARDT; TIMM, 2012). Evapotranspiração de cultura é a terminologia adequada quando se refere à quantidade de água utilizada por uma cultura sem restrição hídrica, da semeadura até a colheita, em todas as fases de desenvolvimento (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997). Seu valor pode ser estimado através de diversas metodologias, sendo as mais comumente utilizadas: Thornthwaite (1948), Penman (1948) e Penman e Monteith (ALLEN et al., 1998), em função de sua fácil aplicação prática. A evapotranspiração de cultura é uma importante variável de saída do balanço hídrico de cultura (BRUNO et al., 2007).

De acordo com Dourado Neto et al. (1999), o balanço hídrico é uma ferramenta muito útil para o entendimento do consumo de água pelas culturas agrícolas e auxilia no processo de tomada de decisões, para uniformização e manejo do sistema agrícola. Thornthwaite e Mather (1955) desenvolveram um método de estimativa do balanço hídrico que permite uma aproximação coerente com dados observados. Outros autores começaram a questionar a taxa de perda de água deste método, e tentaram melhorar este valor, como Rijtema e Aboukhaled (1975) e Dourado Neto e de Jong Van Lier (1993).

A produtividade potencial de uma cultura é determinada por fatores genéticos e pelo grau de adaptação ao ambiente, sem restrição de água, nutrientes, pragas e doenças, (DOORENBOS; KASSAM, 1994). A disponibilidade hídrica afeta o crescimento e desenvolvimento da cultura de soja, especialmente durante o período reprodutivo, fase de elevada atividade fisiológica (FAGAN, 2008).

Dentro deste contexto, o trabalho tem por objetivos: (i) estimar o armazenamento de água no solo através dos métodos de estimativa de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather, Rijtema e Aboukhaled e Cossenoidal, combinados com a evapotranspiração de cultura estimada pelos métodos de Thornthwaite, Penman e Penman e Monteith, a fim de comparar com o armazenamento de água no solo medido com tensiômetros de polímeros; (ii) estimar a produtividade deplecionada por água e comparar com os dados observados em um experimento de campo com uma cultura da soja.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura de soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma espécie pertencente à família Fabaceae, tendo como centro de origem a China. Seu cultivo no Brasil começou a expandir-se na década de 70, no Rio Grande do Sul, e atualmente, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2012a), sua produção na safra 2011/2012 alcançou 66,38 milhões de toneladas, sendo 11,9% inferior a produção da safra anterior, em 25 milhões de hectares. Esses dados mostram a importância da produção de soja no Brasil, que hoje, em conjunto com os EUA, é um dos maiores produtores mundiais do grão.

De acordo com o segundo levantamento de intenção de plantio 2012/2013, observa-se um aumento na área a ser cultivada com soja no país de aproximadamente 7,6%, totalizando 27 milhões de hectares. Este incremento deve-se à quebra de safra causada pela estiagem nos principais estados brasileiros e países produtores, associada aos excelentes preços de comercialização observados na safra 2011/12. Além disso, estima-se uma produção entre 80,09 e 83,0 milhões de toneladas, ou seja, um aumento de até 25 milhões de toneladas em relação ao último ano agrícola (CONAB, 2012b).

Os grãos de soja são a maior fonte de proteína na alimentação animal e a segunda fonte de óleo vegetal (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2012), pois contém em média de 35 a 55% de proteínas digestíveis e 17 a 27% de gorduras (ALIYEV; MIRZOYEV, 2010). Também são utilizados na alimentação humana em função dos benefícios como a redução de colesterol e prevenção de câncer e obesidade (MARTINS, 2011). Este efeito protetor contra doenças crônicas deve-se à presença de um flavonóide denominado isoflavona, o qual apresenta estrutura e atividade semelhante ao hormônio estrogênio humano (MORAES; COLLA, 2006).

2.2 Tensiômetros de polímero

Os tensiômetros de polímero são dispositivos desenvolvidos por Bakker et al. (2007) na Universidade de Wageningen, na Holanda, com o objetivo de contornar problemas encontrados na utilização de tensiômetros comuns. Este tensiômetro é composto basicamente por um disco de cerâmica maciço, um revestimento de aço inoxidável onde fica alocado um polímero (de grande capacidade de expansão ao receber água e de retração ao perder água) e um transdutor de pressão (para medir as variações de pressão devidas às entradas e saídas de água através do disco de cerâmica) com um sensor de temperatura (Figura 1 e Apêndice A).

Os sensores estão ligados a um armazenador de dados individual (datalogger) e os dados são coletados a cada 15 minutos. Mais detalhes podem ser encontrados em Bakker et al. (2007).

O reservatório preenchido com água dos tensiômetros comuns limita a sua aplicação a potenciais matriciais de água no solo acima de aproximadamente $-0,085$ MPa. Já os tensiômetros preenchidos com polímeros ao invés de água são capazes de mensurar um intervalo bem maior de potenciais de água no solo (BAKKER et al., 2007). De acordo com Durigon et al. (2011) e Durigon e De Jong Van Lier (2011), este novo tensiômetro tem capacidade de medir a tensão de água retida no solo ou potencial matricial (h) desde a saturação, quando $h = 0$ m, até o ponto em que $h = -200$ m, ultrapassando a tensão de água no ponto de murcha permanente (em torno de $h = -150$ m). Deste modo, este equipamento vem como uma alternativa eficiente para a realização de medidas de h .

Figura 1 - Tensiômetro de polímero. Fonte: Durigon; de Jong Van Lier (2011)

Utilizando tensiômetros de polímeros, van Der Ploeg et al. (2008) conseguiu monitorar com sucesso h em diferentes níveis de estresse hídrico e concluiu que estes equipamentos apresentam potencial para melhorar a análise da absorção da água pelas raízes, além de seu uso na irrigação em condições de solos secos. Durigon et al. (2011) e Durigon e de Jong Van Lier (2011) concluíram que o uso de tensiômetros permite a determinação de relações entre a condutividade hidráulica, teor de água e h na faixa de -1 e -150 m.

2.3 Armazenamento de água no solo

O armazenamento de água pode ser conceituado como a quantidade de água que fica armazenada em uma determinada camada de solo, de espessura conhecida (PEREIRA;

VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997). O cálculo do armazenamento a partir do conteúdo volumétrico de água no solo permite que a medida de água seja dada em mm (REICHARDT; TIMM, 2012), assim como acontece com valores de precipitação e armazenamento em balanço hídrico. Para isso, é necessário converter os dados de potencial matricial em dados de umidade volumétrica, pelo uso da curva de retenção de água no solo.

De acordo com Moraes (1991), a curva de retenção é um atributo físico-hídrico de difícil caracterização, especialmente pelo tempo que se consome nas análises. Esta curva representa a relação entre a umidade do solo (com base em massa ou volume) e o potencial matricial correspondente e é importante em estudos que tratam de água no solo. A retenção de água no solo depende do tamanho e distribuição de suas partículas, do seu arranjo, do teor de matéria orgânica e da composição da solução do solo (COOPER, 1999; MORAES, 1991).

De posse dos pontos da curva, é possível ajustar os valores que entram no cálculo do conteúdo volumétrico de água pela Equação de van Genuchten, que será descrita mais à frente, pelos coeficientes empíricos α , m e n , a umidade volumétrica θ_s (geralmente correspondente à tensão de 0,05 m H₂O); a umidade volumétrica θ_r (correspondente à tensão de 150 m H₂O). A partir disso, é possível aplicar o valor do potencial matricial medido no solo com o tensiômetro de polímero à Equação de van Genuchten e obter os respectivos valores de umidade volumétrica. O valor médio da umidade de uma camada de solo multiplicado pela espessura da camada resulta no armazenamento de água na camada, em mm, respeitadas as unidades (REICHARDT; TIMM, 2012).

A capacidade de campo (CC) é a capacidade máxima (ou armazenamento máximo) que um solo apresenta de reter água em seus poros contra a ação da gravidade. Sendo a drenagem um processo dinâmico, a CC varia tanto no espaço quanto no tempo. Essas variações, bem como as iniciais de contorno durante a medida em um perfil de solo resultam em valores bem distintos de CC. Por isso existe muita controvérsia em torno das definições de CC baseadas em valores determinados de potencial matricial, como -6, -10 e -333 kPa, pois cada valor apresenta limitações e é mais apropriado para cada tipo de solo. Para projetos de irrigação em nossos solos tropicais, é mais recomendado o uso de potenciais maiores (-10 a -6 kPa) pois ocorrem mais frequentemente nesses solos sob condição de campo (REICHARDT, 1988).

A água armazenada pelo solo na CC não é igualmente disponível em todas as faixas de umidade do solo, pois quando o fluxo de água no solo não atende mais à demanda atmosférica, a planta entra em murcha. O ponto de murcha permanente (PMP) é o teor de umidade no solo abaixo do qual a planta não consegue extrair água do solo na mesma

intensidade em que ela transpira ou o limite mínimo da água armazenada no solo que poderá ser utilizada pelas plantas (REICHARDT, 1987; REICHARDT; TIMM, 2012).

A capacidade de água disponível (CAD) é a água compreendida entre a CC e o PMP de um solo. Ela representa a capacidade de armazenamento útil do solo ou a quantidade de água disponível para a cultura. Seu valor é necessário para a realização do balanço hídrico (REICHARDT; TIMM, 2012).

2.4 Evapotranspiração

A evaporação da água é um processo regido por leis físicas no qual a substância passa da fase líquida para a fase gasosa. Pode ocorrer em grandes massas de água e em superfícies úmidas, como nas plantas e no solo. Já a transpiração é a perda de água na forma de vapor através de uma planta, água esta que foi utilizada nos diversos processos metabólicos envolvidos no crescimento e desenvolvimento. A ocorrência simultânea dos dois processos é denominada de evapotranspiração, dependente da vegetação, demanda atmosférica, disponibilidade de energia e do suprimento de água do solo para as plantas (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; REICHARDT; TIMM, 2012).

Evapotranspiração potencial (*ETP*) ou de referência é a água utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama de 0,08 a 0,15 m de altura, em crescimento ativo, cobrindo completamente o terreno e com bom suprimento de umidade. Evapotranspiração real (*ET_r*) é a quantidade de água realmente utilizada por uma extensa superfície gramada, em crescimento ativo, cobrindo completamente o solo, com ou sem restrição hídrica (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Evapotranspiração de cultura (*ETC*) é a quantidade de água utilizada por uma cultura sem restrição hídrica, da semeadura até a colheita, em todas as fases de desenvolvimento (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997). Seu valor é produto da *ETP* com o coeficiente de cultura (*K_c*) e varia de acordo com a espécie e cultivar, com as fases fenológicas e é função do índice de área foliar (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

Diversos fatores afetam a *ETC*, e entre os fatores climáticos estão a radiação líquida, a temperatura, a umidade relativa do ar e o vento. Também existem fatores da planta, como a espécie (define a arquitetura da planta), albedo, índice de área foliar, estágio de desenvolvimento, altura da planta e profundidade do sistema radicular. Além disso, devem-se levar em consideração os fatores relacionados ao solo e o seu manejo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

A *ETP* pode ser estimada por fórmulas teóricas e serve como referência quando se busca conhecer a *ETC* em condições não-padrão. Existem diversos métodos empíricos disponíveis na literatura para este fim, como Thornthwaite (1948), Penman (1948), Makkink (1957), Priestley e Taylor (1972), Hargreaves e Samani (1974), Doorenbos e Pruitt (1977), Penman e Monteith (ALLEN et al., 1998), entre outros. Os mais comumente utilizados, em função de sua fácil aplicação prática, são Thornthwaite, Penman e Penman-Monteith, este último sendo o método padrão adotado pela FAO.

O método de Thornthwaite é criticado pela estimativa da *ETP* somente utilizando-se valores de temperatura do ar como variável independente, mas é adequado para condições em que a área de bordadura é considerada (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997). Camargo (1962), em seu estudo com lisímetros gramados, determinou a evapotranspiração em escala mensal para o planalto do estado de São Paulo e concluiu que a *ETP* gera valores aproximados de 130 mm em janeiro e metade deste valor em julho, valores muito próximos aos medidos em evapotranspirômetros. Ou seja, o método de Thornthwaite estima adequadamente a *ETP* em escala mensal para o estado de São Paulo. Bruno (2006) testou o método em comparação com um método de campo e obteve uma boa concordância, porém com uma tendência de subestimativa das variáveis.

Penman (1948) utiliza um número maior de variáveis que nem sempre estão disponíveis, mas estima bem a *ETP* quando comparado ao método padrão (EMBRAPA, 2010). O método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) também utiliza muitas variáveis meteorológicas, o que acaba impossibilitando o seu uso em locais onde estações meteorológicas mais sofisticadas não estão disponíveis.

2.5 Balanço hídrico e armazenamento de água

O balanço hídrico é o somatório das quantidades de água que entram e saem de um volume de solo, em um dado intervalo de tempo, e o restante é a quantidade líquida de água que nele fica armazenado (REICHARDT; TIMM, 2012). De acordo com Dourado Neto et al. (1999), o balanço hídrico é uma ferramenta muito útil para o entendimento do consumo de água pelas culturas agrícolas e auxilia no processo de tomada de decisões, para uniformização e manejo do sistema agrícola. Precipitação, irrigação, orvalho, drenagem lateral, ascensão capilar são componentes de entrada, enquanto que evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda são os de saída. Muitos destes componentes acabam sendo desprezados ou agrupados para facilitar o processo de cálculo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

De acordo com Bruno (2007), o uso de balanços hídricos climatológicos ao invés dos balanços hídricos medidos diretamente em condições de campo permite um manejo mais prático da cultura, em função de que os balanços hídricos climatológicos baseiam-se em dados de temperatura, radiação solar e precipitação, entre outros, que são coletados normalmente em postos meteorológicos.

O método clássico para estimativa do balanço hídrico é o de Thornthwaite e Mather (1955), que permite estimar a disponibilidade de água no solo em função dos dados de chuva, *ETP*, e da capacidade de água disponível (*CAD*). Este método considera que a taxa de perda de água por evapotranspiração varia linearmente com o armazenamento de água no solo.

Em 1975, Rijtema e Aboukhalel propuseram uma modificação no método, passando a considerar um fator de água disponível p para definir duas zonas de umidade diferentes, definidas pelo armazenamento crítico $[(1 - p)CAD]$. A zona seca de umidade compreende os valores de armazenamento maiores ou iguais a zero e menores ou iguais ao armazenamento crítico. Já a zona ótima de umidade compreende os armazenamentos menores ou iguais à *CAD* e maiores ou iguais ao armazenamento crítico. Na zona ótima, a taxa de perda de água é máxima e constante e na zona seca tenderá a zero, sendo função do armazenamento.

O método Cossenoidal proposto por Dourado Neto e de Jong Van Lier (1993) também leva em consideração o fator p , mas a curva da taxa de perda de água apresenta um comportamento cossenoidal dentro da zona seca. Os autores recomendam o uso deste modelo para o balanço hídrico pelo fato de que este deve melhor estimar o valor do armazenamento de água no solo. Tal modelo também leva em consideração as zonas seca e ótima de umidade.

2.6 Produtividade deplecionada por água

A produtividade potencial de uma cultura é determinada por fatores genéticos e pelo grau de adaptação ao ambiente, tendo disponível água e nutrientes, sem limitação por pragas e doenças, durante todos os períodos de desenvolvimento até o amadurecimento (DOORENBOS; KASSAM, 1994; HEIFIG, 2002). A disponibilidade hídrica nos períodos de maior demanda pela cultura é imprescindível para alcançar o resultado esperado, pois ela participa de todos os processos metabólicos que vão estabelecer o crescimento e o desenvolvimento, além de determinar o período de crescimento da cultura (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Além disso, a adoção de práticas de manejo que minimizem o impacto dos fatores externos na assimilação de carbono e de nitrogênio na fase reprodutiva é determinante da produtividade de grãos. Esta é a fase que a cultura apresenta elevada atividade fisiológica,

alcançando a máxima taxa de assimilação de carbono e nitrogênio (FAGAN, 2008; TAIZ, ZEIGER, 2009).

A deficiência hídrica é caracterizada quando a ETr é menor que a ETC . Ela induz adaptações fisiológicas e morfológicas, como o fechamento estomático. Como consequência, ocorre a redução da fotossíntese, afetando o crescimento e a produtividade (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). De acordo com Marin et al. (2000), o modelo de Doorenbos e Kassam (1994) é comumente empregado na estimativa do rendimento de culturas agrícolas em função de determinada condição hídrica. O modelo penaliza a produtividade potencial (Y_o) a partir da deficiência hídrica, função do déficit de evapotranspiração e de um coeficiente de sensibilidade ao déficit, resultando em uma produtividade real ou deplecionada por água (Y_r). Este coeficiente, também conhecido por fator de resposta da cultura k_y relaciona a queda de rendimento relativo ($1 - Y_r/Y_o$) com o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - ETr/ETC$), sendo ETC a evapotranspiração da cultura em cada fase de desenvolvimento. Nos períodos específicos de crescimento de floração e de formação da colheita da soja, a penalização pelo k_y é relativamente grande, enquanto que para os períodos vegetativo e de maturação é pequena.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local do experimento

O experimento foi conduzido na área experimental do Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), no município de Piracicaba, SP (Figura 2). A área está localizada a uma altitude de 546 metros, nas coordenadas geográficas 22°42' de latitude e 47°30' de longitude.

Figura 2 - Vista geral da área experimental com a cultura de soja. Piracicaba, 2012

O clima da região é classificado como Cwa, segundo a classificação de Köppen, com verão chuvoso e seca no período de inverno, com as temperaturas médias variando de 24,6 °C a 17,1°C (Figura 3). A precipitação pluvial média anual é da ordem de 1200 mm (Fonte: LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE BIODISSISTEMAS - LEB, 2012). O solo é classificado como Latossolo vermelho distrófico argiloso, profundo, de textura muito argilosa e boa drenagem (HEIFIG, 2002).

Os dados de precipitação, temperaturas média, máxima e mínima diárias para o período de condução do experimento de campo são apresentadas na Figura 4 e no Anexo A. Observa-se que a temperatura média para os meses de janeiro a maio seguiu a mesma tendência das temperaturas normais para Piracicaba. Em relação à precipitação, para o mês de

janeiro a ocorrência foi normal, para fevereiro e março foi aproximadamente de 50 e 80 mm acima da média, respectivamente. Enquanto isso, no mês de abril choveu 90 mm a menos que o normal.

Figura 3 - Valores médios mensais de precipitação e temperatura (média, máxima e mínima), medidas em uma estação meteorológica convencional, no período de 1917 a setembro de 2012

Figura 4 - Precipitação e temperatura (média, máxima e mínima), medidas em uma estação meteorológica automática, no período de 05 de janeiro a 10 de maio de 2012

3.2 Instalação e condução do experimento

A cultura de soja, cultivar M7908-RR (Monsoy), foi semeada no dia 5 de janeiro de 2012. O espaçamento utilizado foi de 0,45 m entre linhas e a densidade foi de 15 sementes por metro, totalizando uma população aproximada de 300 000 plantas hectare⁻¹. As sementes foram tratadas com inseticida e fungicida e inoculadas com inoculante turfoso na dose de 150

g a cada 50 kg de sementes. A adubação da cultura foi realizada no momento da semeadura, aplicando-se 250 kg ha⁻¹ da formulação NPK 0-20-20. O manejo cultural foi realizado segundo a escala fenológica proposta por Fehr e Caviness (1977), sendo necessárias aplicações de herbicida, inseticida e fungicida. As datas, princípios ativos e doses de produto comercial utilizados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1- Descrição dos produtos aplicados na cultura de soja no período experimental para manejo de pragas e doenças

Data	Princípio ativo	Dose de produto comercial
2 fevereiro	Glifosato	3L ha ⁻¹
15 fevereiro	Alfacipermetrina+Teflubenzuron	120 mL ha ⁻¹
1 março	Piraclostrobina	500 mL ha ⁻¹
3 março	Alfacipermetrina+Teflubenzuron	120 mL ha ⁻¹
14 abril	Piraclostrobina	500 mL ha ⁻¹

3.3 Instalação dos tensiômetros de polímero

A instalação dos tensiômetros de polímero ocorreu no dia 9 de janeiro de 2012, em dois pontos de observação localizadas na área experimental. Em cada ponto de observação foram instalados três tensiômetros, totalizando seis. Foram instalados a 0,05 m; 0,15 m e 0,3 m de profundidade, representando as camadas de solo de 0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente. Uma trincheira foi aberta e utilizou-se um trado de solo para a abertura dos orifícios em que os tensiômetros ficariam alocados, nas diferentes profundidades. Com o auxílio de um cano de PVC, os tensiômetros foram encaixados no devido lugar. Os fios que ligam cada tensiômetro ao datalogger foram enterrados e cada conjunto de dataloggers ficou protegido sob uma estrutura de metal, a fim de evitar a radiação solar direta e a chuva.

3.4 Estimativa do armazenamento em função do potencial de água no solo

Os tensiômetros de polímero fornecem um valor do potencial matricial do solo h a cada 15 min. Estes dados foram transformados em um valor médio diário para o cálculo do conteúdo volumétrico de água, em planilhas eletrônicas do Microsoft Office Excel®. O datalogger conectado a um dos tensiômetros da camada 0,1-0,2 m apresentou problema em certo período para o armazenamento dos dados, resultando em uma série incompleta. Deste modo, optou-se pela exclusão de todos os dados coletados por este tensiômetro no período,

utilizando uma repetição apenas. Utilizou-se o valor médio dos dois pontos de observação para prosseguir com o cálculo.

O conteúdo volumétrico de água no solo θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para cada camada de solo foi calculado através da equação de van Genuchten (1980), apresentada na Equação 1:

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

em que θ_s é a umidade volumétrica correspondente à tensão de 0,05 m H₂O ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r é a umidade volumétrica correspondente à tensão de 150 m H₂O ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); h é o potencial matricial médio diário (m); α , m e n são coeficientes empíricos da equação.

A Figura 5 apresenta o ajuste da curva de retenção de água do Latossolo realizado em Piracicaba, SP, por Moraes (1991) através do modelo de van Genuchten (1980). Moraes coletou 250 amostras a 0,25 m de profundidade e os dados de umidade referem-se aos potenciais matriciais h de 0,05; 0,1; 0,6; 1,0; 3,06; 8,16; 30,6 e 150 m H₂O. É importante ressaltar que a umidade inicial ou θ_s corresponde à 0,05 m H₂O. Os valores de θ_s e θ_r foram 0,468 e 0,296, e de α , m e n foram 0,024220, 0,330056 e 1,580702, respectivamente.

Figura 5 - Curva de retenção de água média referente à 250 pontos de amostragem. Fonte: Moraes (1991)

O armazenamento de água médio diário no solo da cultura, chamado de A (mm), foi calculado estimando a umidade média $\bar{\theta}$ entre as camadas 0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,4 m, obtidas pela aplicação da curva de retenção de água da Figura 5 e por meio da Equação 2:

$$A = (\bar{\theta} - \theta_{PMP}) * Z_e \quad (2)$$

onde $\bar{\theta}$ o conteúdo volumétrico médio de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_{PMP} o conteúdo volumétrico de água no solo no ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e Z_e a profundidade que as raízes da cultura em estudo alcançam (mm). Neste estudo, considerou-se um alcance de 0,4 m ou 400 mm pelas raízes.

A CAD foi determinada pela diferença do armazenamento de água do solo na CC e no PMP, multiplicada pela profundidade Z_e . Foram consideradas as pressões de 1,0 m H₂O e 150 m H₂O para sua estimativa (REICHARDT, 1988). Também foi estimada a CAD utilizando-se os valores de CC de 0,6 m H₂O e 3,33 m H₂O (BORTOLOTO, 2010; REICHARDT, 1988), devido à polêmica do valor de potencial a ser escolhido para a CC.

3.5 Balanço hídrico

3.5.1 Estimativa da evapotranspiração de referência

Para a estimativa da ETP (mm d^{-1}), foram utilizados dados de uma estação meteorológica automática do Posto Meteorológico, Departamento de Engenharia de Biosistemas, localizado a 22°42'30'' de latitude, 47°30'00'' de longitude e 546 m de altitude. As estimativas foram realizadas através dos métodos de Thornthwaite (THORNTWHAITE, 1948), Penman (PENMAN, 1948; EMBRAPA, 2010) e Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

3.5.1.1 Método de Thorntwaite

O cálculo da evapotranspiração pelo método de Thornthwaite (ETP_{TH}) é realizado conforme segue:

$$ETP_{TH} = f * 16 * \left(10 * \frac{Tn}{I}\right)^a \quad (3)$$

em que Tn é a temperatura média do mês n , em °C; I é o índice de calor na região, calculado conforme a Equação 5; f é um fator de correção em função da latitude e do mês do ano, apresentado na Tabela 2; e a é um índice térmico regional, calculado pela Equação 6. Neste caso, o resultado da ETP_{TH} será em mm mês^{-1} , pois a evapotranspiração potencial padrão é calculada para um mês de 30 dias, considerando-se que cada dia tem um fotoperíodo de 12 horas. O fator f é importante para a sua correção e transformação em número real de dias do mês. Para a obtenção da ETP_{TH} em escala diária (mm dia^{-1}), basta dividir o resultado em mm mês^{-1} pelo número de dias do mês.

A Equação 3 é utilizada quando $0 \leq Tn < 26,5^\circ\text{C}$. No caso de $Tn \leq 26,5^\circ\text{C}$, ETP_{TH} será dada por:

$$ETP_{TH} = -415,85 + 32,24Tn - 0,43Tn^2 \quad (4)$$

Tabela 2 - Fator de correção da evapotranspiração em função do fotoperíodo e do número de dias do mês, para latitude 22° Sul

Mês	f	Mês	f
Janeiro	1,14	Julho	0,94
Fevereiro	1,00	Agosto	0,99
Março	1,05	Setembro	1,00
Abril	0,97	Outubro	1,09
Maio	0,95	Novembro	1,10
Junho	0,90	Dezembro	1,16

Fonte: Thornthwaite (1948); Pereira; Angelocci; Sentelhas (2002)

O valor de I depende do ritmo anual da temperatura e integra o efeito térmico de cada mês, sendo preferencialmente calculado com os valores normais para o local (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002):

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2Tn)^{1,514} \quad (5)$$

Da mesma forma que I , a é calculado com as normais climatológicas, sendo estes coeficientes característicos da região e independentes do ano de estimativa. O expoente a é calculado de acordo com a Equação 6:

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,7912 * 10^{-2} I + 0,49239 \quad (6)$$

3.5.1.2 Método de Penman

Para a estimativa da (ETP_p) pelo método de Penman, utilizou-se a equação:

$$ETP_p = \frac{W * R_n}{\lambda} + (1 - W)E_a \quad (7)$$

em que λ é o calor latente de evaporação (MJ kg^{-1}); W é o fator de ponderação dependente da temperatura do ar, obtido pela Equação 8; R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); E_a é o poder de evaporação do ar ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), obtido pela Equação 12.

O fator W é dado por:

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (8)$$

sendo Δ a inclinação da curva de pressão de vapor de saturação e temperatura do ar, em kPa °C⁻¹ (Equação 10), e γ a constante psicrométrica, que utiliza o valor da pressão atmosférica (Pa) no cálculo e é obtida por:

$$\gamma = 0,664742 * 10^{-3} * Pa \quad (9)$$

A inclinação da curva de pressão de saturação de vapor é calculada através da equação:

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (10)$$

sendo e_s a pressão de saturação de vapor (kPa), calculada pela Equação 11 e T_{med} a temperatura média diária (°C).

$$e_s^{T_{med}} = 0,6108 e^{\frac{17,27 * T_{med}}{237,3 + T_{med}}} \quad (11)$$

O poder de evaporação do ar (E_a , MJ m⁻² d⁻¹) é obtido através da equação:

$$E_a = f(U) DPV \quad (12)$$

em que $f(U)$ é dado pela Equação 14 e DPV é o déficit do vapor de saturação (kPa), obtido por:

$$DPV = e_s - e_a \quad (13)$$

sendo e_a a pressão atual de vapor (kPa). A função empírica da velocidade do vento $f(U)$ é calculada por:

$$f(U) = m(a + bU_2) \quad (14)$$

em que m é igual a 6,43 MJ m⁻² d⁻¹ kPa⁻¹; $a = 1$; $b = 0,526 \text{ s m}^{-1}$ e U_2 é igual à velocidade do vento medida a 2 m da superfície do solo (m s⁻¹).

3.5.1.3 Método de Penman e Monteith

O cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith (ETP_{PM}) pode ser realizado de acordo com a Equação 14:

$$ETP_{PM} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273,16} U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (15)$$

em que R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹); G é a densidade do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹); γ é a constante psicrométrica (kPa °C⁻¹), calculada pela equação 9; T_{med} é a temperatura média diária (°C); U_2 é a velocidade do vento medida a 2 m da superfície do solo

(m s⁻¹); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão atual de vapor (kPa) e Δ é a inclinação da curva de pressão de saturação de vapor (kPa°C⁻¹), calculada pela Equação 10. A pressão de saturação de vapor foi calculada de acordo com as Equações 16, 17 e 18:

$$e_s^{T_{max}} = 0,6108e^{\frac{17,27 \cdot T_{max}}{237,3 + T_{max}}} \quad (16)$$

$$e_s^{T_{min}} = 0,6108e^{\frac{17,27 \cdot T_{min}}{237,3 + T_{min}}} \quad (17)$$

$$e_s = e_s^{T_{max}} - e_s^{T_{min}} \quad (18)$$

sendo T_{max} a temperatura máxima diária do ar em °C e T_{min} a temperatura mínima diária do ar em °C. A pressão atual de vapor foi calculada utilizando-se a umidade relativa média diária (UR) por:

$$e_a = \frac{(UR \cdot e_s)}{100} \quad (19)$$

3.5.2 Balanço hídrico de cultura e armazenamento de água no solo

Para o cálculo do balanço hídrico de cultura e do armazenamento de água no solo, foram utilizados os métodos de Thornthwaite e Mather (THORNTHWAITE-MATHER, 1955), de Rijtema e Aboukhaled (RIJTEMA; ABOUKHALED, 1975; DOURADO NETO; DE JONG VAN LIER, 1993) e Cossenoidal (DOURADO NETO; DE JONG VAN LIER, 1993). Para o balanço hídrico de cultura, a ETC deverá ser utilizada para calcular o armazenamento de água no solo em função do tipo de vegetação, fase de crescimento e desenvolvimento (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). A ETC pode ser calculada com a Equação 20, proposta por Jensen (1968):

$$ETC = Kc * ETP \quad (20)$$

O coeficiente de cultura Kc é um coeficiente de ajuste e ETP é a evapotranspiração estimada pelos diferentes métodos. Os valores Kc foram retirados de Doorenbos e Kassam (1994).

3.5.2.1 Método de Thornthwaite e Mather

A estimativa do armazenamento (chamado de M para este método) e do negativo acumulado L pelo método de Thornthwaite-Mather (1955) foi realizada de acordo com a condição do saldo do dia, valor resultante da diferença entre P e ETC . Quando o saldo for menor ou igual a zero, então:

$$L_i = L_{i-1} - S_i \quad (21)$$

sendo L_{i-1} o negativo acumulado do dia anterior e S_i o saldo do dia (mm), enquanto que:

$$M_i = CAD e^{-\frac{L_i}{CAD}} \quad (22)$$

Quando M_i for maior que a CAD , então M_i será igual a CAD . Já quando o saldo for maior do que zero,

$$M_i = M_{i-1} + S_i \quad (23)$$

$$L_i = -CAD \ln \frac{M_i}{CAD} \quad (24)$$

3.5.2.2 Método de Rijtema e Aboukhaled

O método de Rijtema e Aboukhaled (1975) leva em consideração o fator de água disponível ou fator p para a estimativa do armazenamento (chamado de R para este método), tabelado em Allen et al. (1998) quando a ETC for de 5 mm d^{-1} . Nos dias em que esta condição não é atendida, p pode ser calculado por:

$$p = 0,5 + (0,04(5 - ETC)) \quad (25)$$

Se $(1 - p)CAD \leq R_{i-1} \leq CAD$, então:

$$R_i = R_{i-1} + S_i \quad (26)$$

$$L_i = 0 \quad (27)$$

Se $0 \leq R_{i-1} \leq (1 - p)CAD$ e o saldo for menor que zero:

$$L_i = L_{i-1} - S_i \quad (28)$$

$$R_i = (1 - p)CAD \exp\left(\frac{L_i}{(1-p)CAD}\right) \quad (29)$$

Se $0 \leq R_{i-1} \leq (1 - p)CAD$ e o saldo for maior que zero:

$$R_i = R_{i-1} + S_i \quad (30)$$

$$L_i = CAD [p - (1 - p) \ln\left(\frac{R_i}{(1-p)CAD}\right)] \quad (31)$$

Quando R_i for maior que a CAD , então R_i será igual a CAD .

3.5.2.2 Método Cossenoidal

O cálculo do fator p ocorre conforme já foi citado no método anterior e assume-se que a taxa de perda de água não é linear, mas sim segue um comportamento cossenoidal. Já L_i e o armazenamento (chamado de C neste método) são estimados por:

Se $0 \leq C_{i-1} \leq (1-p)CAD$, então:

$$L_i = CAD \left\{ p + \frac{2}{\pi} (1-p) \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{C}{(1-p)CAD} \right) \right] \right\} \quad (32)$$

e quando $(1-p)CAD \leq C_{i-1} \leq CAD$:

$$L_i = CAD - C_i \quad (33)$$

Para o molhamento, quando $L_{i-1} \geq pCAD$

$$C_i = (1-p)CAD \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{\frac{L}{CAD} - p}{1-p} \right) \right] \right\} \quad (34)$$

e quando $0 \leq L_{i-1} < pCAD$:

$$C_i = CAD - L_i \quad (35)$$

3.6 Produtividade deplecionada por água

A estimativa da produtividade deplecionada por água Yr foi realizada de acordo com o método apresentado por Doorenbos e Kassam (1994):

$$Yr = \left[1 - ky \left(1 - \frac{ETr}{ETC} \right) \right] * Yo \quad (36)$$

em que ky é um fator de sensibilidade ao estresse hídrico ou fator de resposta da cultura, variável com a fase de desenvolvimento da cultura; ETr é a evapotranspiração real da cultura; e ETC é a evapotranspiração da cultura em cada fase de desenvolvimento, estimada conforme a Equação 20, com base no método de Thornthwaite e Mather (1955). Os valores de Kc foram retirados de Doorenbos e Kassam (1994): 0,2 para os períodos de estabelecimento e desenvolvimento vegetativo; 0,8 para o período de florescimento; 1,0 para o período de frutificação e 0,2 para o período de maturação. Os valores de CAD também variaram nos períodos. A exigência térmica da cultura está de acordo com Camargo (1984), com temperatura base para a cultura de 14 °C e 1300 graus dias acumulados. Para a estimativa da produtividade potencial, utilizou-se:

$$Yo = Fb * C_{IAF} * C_{RESP} * C_{COL} * C_U * NDC \quad (37)$$

em que Fb é a fotossíntese bruta (representa a produção bruta de matéria seca de uma cultura padrão); C_{IAF} é a correção da fotossíntese em função do desenvolvimento da cultura e da área foliar; C_{RESP} é a correção para a taxa de manutenção da cultura (respiração) dependente da temperatura do ar; C_{COL} é a correção para o índice de colheita; C_U é a correção para a umidade da parte colhida para conversão do peso seco em peso fresco e NDC é a duração do período de desenvolvimento da cultura, propostos por Pereira; Angelocci; Sentelhas (2002). Utilizou-se a planilha elaborada por Rolim et al. (1998) para a estimativa de Y_o , Y_r e da quebra de produtividade Q (%):

$$Q = \left(1 - \frac{Y_r}{Y_o}\right) 100 \quad (37)$$

3.7 Análise estatística

Os resultados obtidos foram avaliados através do Teste de normalidade de Shapiro-Wilks. Foi realizada a análise de regressão, e a avaliação do coeficiente angular (b) e a correlação dos dados estimados pelos diferentes métodos agrometeorológicos e dos dados estimados com os dados medidos pelo Teste de Correlação de Spearman (ρ).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise do potencial matricial do solo medido com os tensiômetros de polímero

Na Figura 6 são apresentados os potenciais matriciais nas camadas de 0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,4 m e o valor médio das três camadas. Na camada de 0-0,1 m, o potencial mínimo foi de -186,2 m e ocorreu em 09/02/12, o que é uma novidade em medidas de potencial em condições de campo pois trata-se de valor além do PMP. Isso ocorreu devido a um período anterior a esta data, de onze dias, em que não houve precipitação pluviométrica ou irrigação. O potencial máximo de -0,8 m ocorreu no dia 22/04/12, em função da precipitação de 49,8 mm no dia anterior. O valor médio foi de -35,7 m para o período. Na camada de 0,1-0,2 m, o valor mínimo do potencial matricial foi de 124,9 m no dia 10/02/12 e máximo de -0,6 m nos dias 10 e 11/01/12. A média foi de -18,9 m. Já para a camada 0,2-0,4 m, o potencial matricial mínimo foi de -87,3 m e ocorreu em 08/04/12, enquanto que o máximo foi de -0,9 m em 30/04/12, com uma média de -14,9 m.

Para as três camadas, o secamento e o molhamento do solo seguiram a mesma tendência, sendo mais visível a variação do potencial matricial na camada mais próxima à superfície. Ocorreu um afastamento das curvas do potencial matricial nos períodos com potenciais muito pequenos. Os menores potenciais ocorreram nos períodos de 31/01/12 a 10/02/12, 18/02/12 a 21/02/12, 03/03/12, 08/03/12 a 12/03/12, 20/03/12 a 22/03/12, 03/04/12 a 08/04/12 e 17/04/12 a 21/04/12 e podem ser explicados pela sequência de períodos anteriores sem precipitação. Na camada 0,2-0,4 m, no período de 04/03/12 a 08/04/12, a curva decresce e não acompanha o padrão das outras profundidades. Quanto maior a profundidade no perfil do solo, menor vai ser a interferência da evapotranspiração sobre o potencial matricial do solo, devido à distribuição radicular que diminui drasticamente em profundidade, com poucas raízes de soja ultrapassando a profundidade de 0,4 m.

O potencial tendeu ao zero nos períodos em que houve grande disponibilidade de água, decorrente da precipitação pluviométrica, que foi de 161,2 mm de 10/01/12 a 27/01/12, 79,6 mm nos dias 10/02/12 a 14/02/12, 59,0 mm nos dias 20/02/12 a 27/02/12, 30,6 mm no dia 03/03/12, 36,4 mm em 08/04/12, 43,9 mm em 21/04/12 e 73,4 mm acumulados entre 26/04/12 e 29/04/12. O alto índice pluviométrico impulsiona baixos valores de potencial matricial e altos valores de umidade no solo (REICHARDT; TIMM, 2012).

Figura 6 - Potencial matricial médio do solo (h , em m) medido com tensiômetros de polímero e precipitação pluviométrica (mm)

4.2 Análise do conteúdo volumétrico de água no solo

O conteúdo volumétrico de água no solo θ está relacionado ao potencial matricial, ou seja, quanto maior o conteúdo de água, maior o potencial matricial (ou menos negativo). A umidade do solo é variável com o tempo, aumenta com a chuva ou com a irrigação e diminui com a drenagem ou com a evapotranspiração (REICHARDT; TIMM, 2012).

O θ variou nas três camadas de solo, conforme pode ser observado na Figura 7. Na camada 0-0,1m, θ variou de $0,303 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,407 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. O valor médio foi $0,344 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para a camada de 0,1-0,2 m, o valor máximo de θ foi de $0,419 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o valor mínimo foi de $0,305 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e a média foi $0,346 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para a camada de 0,2-0,4 m, o valor de θ máximo foi $0,402 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o mínimo foi $0,307 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e o médio foi $0,351 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Na média geral, θ máximo foi de $0,400 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, θ mínimo foi de $0,305 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e θ médio foi de $0,347 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A variação de θ na camada de 0-0,1m foi de $0,104 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Na camada 0,1-0,2 m, a variação de θ foi de $0,114 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Já na camada 0,2-0,4 m, a variação foi de $0,095 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. O valor de θ foi maior em todas as camadas de solo nos períodos em que houve precipitação pluviométrica, como por exemplo, de 10/01/12 a 25/01/12, com 163,7 mm acumulados.

Figura 7 - Conteúdo volumétrico de água nas camadas de 0-0,1 m; 0,1-0,2 m e 0,2-0,4 m e média das três camadas

4.3 Análise de comparação entre os métodos de cálculo do balanço hídrico climatológico

A *ETP* estimada pelos métodos de Thornthwaite, Penamn e Penman-Monteith foi transformada em *ETC* de acordo com a Equação 20 e utilizada para o cálculo do balanço hídrico pelos métodos de Thornthwaite e Mather (M, Figura 8), Rijtema e Aboukhaled (R, Figura 9), e Cossenoidal (C, Figura 10). Os armazenamentos de água no solo da cultura de soja estimados pelos diferentes métodos agrometeorológicos apresentaram valores e distribuição temporal muito similares ao armazenamento de água medido com os tensiômetros de polímero, com uma tendência dos métodos de estimar um valor maior do que o observado. Os resultados foram comparados dois a dois, pela regressão linear e pelo Teste de Correlação de Spearman, isolando-se o método de estimativa de *ETC*.

Figura 8 - Armazenamento de água (mm) medido pelos tensiômetros e estimado pelo método de Thornthwaite e Mather com a evapotranspiração de cultura estimada pelos métodos de Thornthwaite, Penman e Penman e Monteith

Figura 9 - Armazenamento de água (mm) medido pelos tensiômetros e estimado pelo método de Rijtema e Aboukhaled com a evapotranspiração de cultura estimada pelos métodos de Thornthwaite, Penman e Penman e Monteith

Figura 10 - Armazenamento de água (mm) medido pelos tensiômetros e estimado pelo método Cossenoidal com a evapotranspiração de cultura estimada pelos métodos de Thornthwaite, Penman e Penman-Monteith

Na Figura 11 estão apresentadas as regressões lineares entre os armazenamentos estimados utilizando-se a ETC_{TH} . A regressão entre MxR (Figura 11a) obteve um valor de ρ de 0,9957 e um b de 0,9335, demonstrando que M subestima em 6,7% os valores de R. Na Figura 11b encontra-se o resultado de MxC, com ρ de 0,9950 e um b de 0,9443, mostrando que M subestima em 5,6% os valores de C. Já na Figura 11c, na regressão entre RxC, ocorre uma superestimativa de 0,7% dos valores de R por C, com um ρ de 0,9902. Neste caso, a correlação dos dados estimados foi maior entre os métodos M e R.

As análises de regressão entre os armazenamentos estimados a partir da ETC_P são apresentadas na Figura 12. Na Figura 12a, o coeficiente angular da reta foi de 0,8364, ou seja, M subestimou R em 16,4%, e a correlação entre os valores foi de 0,9705. No segundo caso (Figura 12b), a correlação ρ foi maior (0,9988), além de um b de 0,9602, havendo maior coordenação entre as estimativas e uma subestimativa de 3,98% de M em relação à C. Entre R e C, a correlação também foi boa, de 0,9703 e um coeficiente angular de 1,0905. Em geral, o ajuste foi melhor entre M e C.

Na Figura 13 observam-se as regressões entre os valores estimados a partir da ETC_{PM} . A correlação entre MxR foi de 0,9958, com um b de 0,9388, ou seja, ocorreu uma estimativa levemente inferior dos dados por R (Figura 13a). Na Figura 13b, o ajuste entre os dados foi menor, com $\rho = 0,9796$ e o coeficiente angular da reta de 0,9281. No último caso (Figura 13c), o ajuste entre os dados foi bom, de 0,9788, com uma tendência de R subestimar C em torno de 1,9% ($b = 0,9812$). Neste contexto, o melhor ajuste dos dados ocorreu na regressão entre R e C.

Todas as equações apresentaram ajustes bem altos, levando à conclusão de que qualquer um destes métodos poderá ser empregado na estimativa do armazenamento de água, dependendo dos dados disponíveis para o local de interesse (SENTELHAS, 1998). Em geral, o método de estimativa de ETC_{PM} , independente do método de estimativa de balanço hídrico, apresentou melhor correlação do que os demais, possivelmente em função de utilizar apenas a variável temperatura na estimativa da ETC .

Figura 11 - Análise de regressão entre os armazenamentos de água estimados pelos métodos de balanço hídrico de: (a) Thornthwaite e Mather (M) e Rijtema e Aboukhaled (R); (b) Thornthwaite e Mather (M) e Cossenoidal (C); e (c) Rijtema e Aboukhaled (R) e Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Thornthwaite

Figura 12 - Análise de regressão entre os armazenamentos de água estimados pelos métodos de balanço hídrico de: (a) Thornthwaite e Mather (M) e Rijtema e Aboukhaled (R); (b) Thornthwaite e Mather (M) e Cossenoidal (C); e (c) Rijtema e Aboukhaled (R) e Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Penman

Figura 13 - Análise de regressão entre os armazenamentos de água estimados pelos métodos de balanço hídrico de: (a) Thornthwaite e Mather (M) e Rijtema e Aboukhaled (R); (b) Thornthwaite e Mather (M) e Cossenoidal (C); e (c) Rijtema e Aboukhaled (R) e Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Penman e Monteith

4.4 Análise de comparação entre os métodos de cálculo do balanço hídrico climatológico e o armazenamento medido pelos tensiômetros de polímero

Conforme já citado, o armazenamento medido pelos tensiômetros foi menor do que aqueles estimados pelos diferentes métodos de balanço hídrico. Para verificar a magnitude destas diferenças, foi realizada a análise de regressão entre os valores, isolando-se o método de estimativa da ETC (Figuras 14, 15 e 16).

No balanço utilizando-se a ETC_{TH} , o coeficiente de correlação ρ foi de 0,7970 para AxM (Figura 14a), enquanto que b foi igual a 1,3324, ou seja, os dados estimados por A são 33,2% maiores do que os medidos em condições de campo. Para AxR, o valor estimado é 28,4% superior ($\rho = 0,7926$; $b = 1,2842$), e para AxC é 29,3% superior ($\rho = 0,7936$; $b = 1,2926$).

Para o caso da ETC_P , os valores estimados foram maiores do que os medidos em M (Figura 15c), depois em C (Figura 15a) e por último em R (Figura 15b), da ordem de 30,6%, 27,2% e 14,4%. Apesar deste resultado, a correlação entre os dados foi melhor em AxC, com $\rho = 0,7725$, seguido por AxR com $\rho = 0,7718$ e AxM, com $\rho = 0,7705$.

No cálculo do balanço hídrico utilizando-se a ETC_{PM} (Figura 16), a correlação foi maior entre AxC ($\rho = 0,7855$), sendo que C superestima em 29,9% os valores de A. Em segundo lugar vem AxM, superestimando em 35,3% os valores de A e com $\rho = 0,7641$. A pior correlação ocorreu entre A e R, com $\rho = 0,7635$ e $b = 1,3077$, ou seja, os valores de A são 30,8% menores que os estimados.

Entre todos estes testes, o melhor desempenho entre o armazenamento de A e os valores estimados para as condições do estudo ocorreu com a ETC_{TH} , utilizando-se o balanço hídrico M.

Bruno (2006), comparando balanços hídricos climatológicos e de campo obteve uma resposta diferente do que foi observado neste trabalho. Os balanços hídricos climatológicos baseados na ETC_{TH} e na ETC_{PM} subestimaram, dentre outras medidas, o armazenamento de água no solo, com um valor superior para Penman-Monteith em relação a Thornthwaite. Dourado Neto et al. (1999) compararam o armazenamento de água no solo estimado pelo método C com M e R e concluíram que C é o que melhor estima este valor.

Figura 14 - Análise de regressão entre o armazenamento de água medido pelos tensiômetros de polímero (A) e estimado pelos métodos de balanço hídrico (a) Thornthwaite e Mather (M); (b) Rijtema e Aboukhaled (R); e (c) Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Thornthwaite

Figura 15 - Análise de regressão entre o armazenamento de água medido pelos tensiômetros de polímero (A) e estimado pelos métodos de balanço hídrico (a) Thornthwaite e Mather (M); (b) Rijtema e Aboukhaled (R); e (c) Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Penman

Figura 16 - Análise de regressão entre o armazenamento de água medido pelos tensiômetros de polímero (A) e estimado pelos métodos de balanço hídrico (a) Thornthwaite e Mather (M); (b) Rijtema e Aboukhaled (R); e (c) Cossenoidal (C), com estimativa da ETC pelo método de Penman e Monteith

4.5 Análise de comparação entre os métodos de Thornthwaite e Mather com a CAD calculada com 0,6, 1,0 e 3,33 m H₂O e o armazenamento medido pelos tensiômetros de polímero

Além da CC determinada para 1,0 m H₂O (M 1,0), calculou-se também para 0,6 m H₂O (M 0,6) e 3,33 m H₂O (M3,33) para aplicação no cálculo da CAD, a fim de comparar os armazenamentos de água no solo calculados neste estudo. Apenas a estimativa pelo método M foi realizada, pois este apresentou uma maior correlação entre dados medidos e estimados, analisados no item 4.4.

Para as condições do estudo, o melhor ajuste ocorreu para a M 1,0, com $\rho = 0,7970$, como pode ser observado na Figura 17b. Pela análise visual, fica claro que a CC está localizada entre 1,0 m H₂O e 3,33 m H₂O. O coeficiente angular da reta da Figura 17b é 1,3324 e da Figura 17c é 0,6621, ou seja, uma equação superestima em 33,2% e a outra subestima em 33,8% o valor observado, sendo sua localização dentro deste intervalo. Além disso, a correlação de M 1,0 e A é alta ($\rho = 0,7970$). Deste modo, o valor que melhor ajusta-se para esta condição de solo é a CC determinada para 1,71 m H₂O (M 1,71), apresentado na Figura 17d, com b de 0,9983.

Bortolotto (2010) considerou o valor de 3,30 m H₂O, ou um terço de atmosfera, para o cálculo da CC em seu estudo de balanço hídrico para uma cultura de café, em um Latossolo vermelho-amarelo Alumínico típico. De acordo com Reichardt (1988), para o caso de um solo sob condição de campo, é recomendado o uso de potenciais maiores, como 0,6 m H₂O e 1,0 m H₂O. Dentro deste contexto, é possível afirmar que a CC escolhida de 1,0 m H₂O foi a mais adequada, podendo ser utilizada aquela calculada com 1,71 m H₂O.

Figura 17 - Análise de regressão entre o armazenamento de água medido pelos tensiômetros de polímero (A) com o armazenamento de água estimado pelo métodos de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (M) com a CAD de 45,8 mm (0,6 m H₂O, a); de 37,1 mm (1,0 m H₂O, b); de 19,7 mm (3,33 m H₂O, c); e de 28,5 mm (1,71 m H₂O, d)

4.6 Produtividade deplecionada por água

Na Figura 18 são apresentados os resultados da produtividade potencial estimada (Y_o , kg ha^{-1}), produtividade deplecionada pelo déficit hídrico ou produtividade real (Y_r , kg ha^{-1}) e produtividade observada no experimento de campo com soja (Y_c , kg ha^{-1}). A Y_o de 8520,3 kg ha^{-1} , corrigida para a umidade de 12%, é condizente com a situação do material genético adequado e bem adaptado ao ambiente, com disponibilidade de água e nutrientes, e sem limitações devido à presença de pragas, doenças e plantas daninhas (DOORENBOS; KASSAM, 1994; HEIFIG, 2002).

O valor de Y_r (4279,7 kg ha^{-1}) foi estimado levando-se em consideração a depleção em função do déficit hídrico ou o coeficiente de penalização da produtividade pelo déficit hídrico. O déficit hídrico é normalmente o principal fator de perdas em lavouras de soja (FARIAS et al., 2001), e neste caso, gerou uma quebra de produtividade de 55,2%. O valor de Y_r estimado com o mesmo modelo por Araujo (2008) foi de 3567,5 kg ha^{-1} .

Figura 18 - Produtividade potencial (Y_o , kg ha^{-1}), produtividade deplecionada por água (Y_r , kg ha^{-1}) e produtividade observada (Y_c , kg ha^{-1})

A Y_c foi de 1921,8 kg ha^{-1} , valor que se aproxima da produtividade média brasileira, que na safra 2011/2012 foi de 2651 kg ha^{-1} . Tal valor é bem mais baixo do que os demais em função da cultura ter sido implantada em condição real de campo, sendo submetida a diversos estresses, como a presença de insetos e plantas daninhas, e o aparecimento de doenças durante o ciclo da cultura, além do déficit hídrico. Além disso, a semeadura foi tardia e a cultivar utilizada é de ciclo precoce. Deste modo, o fotoperíodo crítico foi alcançado com uma soma

térmica menor do que se a cultura tivesse sido implantada na época mais correta (CAMARGO, 1984; FARIAS, 2001).

5 CONCLUSÕES

1. O método de Thornthwaite e Mather subestima a evapotranspiração atual. Consequentemente, superestima o déficit hídrico e subestima o armazenamento de água no solo pois assume que (a) ETa só é igual à ETP quando $ARM = CAD$; (b) M assume aumento linear entre ARM nulo até a CAD .
2. Os métodos de Rijtema e Aboukhaled e Cossenoidal apresentam estimativas de ETa equivalentes; consequentemente, também apresentam estimativas equivalentes de ARM e déficit hídrico. Porém, enquanto o método R assume aumento linear de ETa na faixa de ARM nulo até ARM crítico, o método C assume variação sigmoidal (o que condiz mais com a realidade).
3. O método de estimativa de evapotranspiração que melhor ajustou-se aos dados reais foi o de Penman e Monteith. Porém, quando houver dados de temperatura disponíveis, recomenda-se a utilização do método de Thornthwaite.
4. A capacidade de campo pode ser determinada experimentalmente com base no valor médio do potencial matricial ou umidade durante o período chuvoso.
5. Para efeito de realização de balanço hídrico, a CAD pode ser determinada com base na determinação prévia do ponto de murcha permanente (teor de água correspondente ao potencial matricial de -15 atm), profundidade efetiva do sistema radicular (profundidade do solo que contribui com 95% da evapotranspiração), com o coeficiente angular da reta igual a um.
6. A produtividade deplecionada por água para a soja foi de $4279,7 \text{ kg ha}^{-1}$, com uma quebra de 55 kg ha^{-1} em relação à sua produtividade potencial neste ambiente.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998. 300p.
- ALIYEV, J.A.; MIRZOYEV, R.S. Photosynthesis and productivity of soybean [Glycine max (L.) Merrill]. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, v.65, n.5-6, p.60-70, 2010.
- ARAÚJO, M.A. **Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa – Paraná**. 2008. 109p. Dissertação (Mestrado em Qualidade e Sustentabilidade Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- BAKKER, G.; van DER PLOEG, M.J.; DE RROIJ, G.H.; HOOGENHAM, C.W.; GOORDEN, H.P.A.; HUISKES, C.; KOOPAL, L.K. & KRUIDHOF, H. New polymer tensiometers: Measuring matric pressures down to the wilting point. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.6, n.1, p.196-202, 2007.
- BORTOLOTO, R.P. **Perdas de nitrogênio por lixiviação em café fertirrigado no oeste baiano**. 2010. 105p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- BRUNO, I.P. **Balanco hídrico e avaliação da chuva na cultura do cafeeiro**. 2006. 52p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- BRUNO, I.P.; SILVA, A.L.; REICHRADT, K. DOURADO NETO, D.; BACCHI, O.O.S.; VOLPE, C.A. Comparison between climatological and field balances for a coffee crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, n.3, p.215-220, 2007
- CAMARGO, A.P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.21, p.163-213, 1962.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, safra 2011/2012**. Brasília, 2012. 33 p. (12º levantamento)a.
- _____. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, safra 2012/2013**. Brasília, 2012. 33 p. (2º levantamento)b.
- COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio**. 1999. 128p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de H.R. Ghey; A.A. de Sousa; F.A.V. Damasceno; J.F. de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 1977. 179p.

DOURADO NETO, D.; DE JONG VAN LIER, Q. Estimativa do armazenamento de água no solo para realização de balanço hídrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.1, p.9-15, 1993.

DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A.G.; FANCELLI, A.L.; FRIZZONE, J.A.; REICHARDT, K. Balance hídrico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua em el suelo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.56, n.3, p.573-546, 1999.

DURIGON, A.; DE JONG VAN LIER, Q. Determinação das propriedades hidráulicas do solo utilizando tensiômetros de polímeros em experimentos de evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.4, p.1271-1276, 2011.

DURIGON, A.; GOOREN, H.P.A.; DE JONG VAN LIER, Q.; METSELAAR, K. Measuring hydraulic conductivity to wilting point using polymer tensiometers in an evaporation experiment. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.10, n.2, p.741-746, 2011.

EMBRAPA. **Evapotranspiração**: uma revisão sobre os métodos empíricos. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 44p. (Documentos, 263).

FAGAN, E.B. **A cultura da soja**: modelo de crescimento e aplicação da estrobilurina piraclostrobina. 2007. 83p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FARIAS, J.R.B.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R.; EVANGELISTA, B.A.; LAZZAROTTO, C. NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.10, n.3, p.415-421, 2001.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1977. 11p. (Special Report, 80).

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. **Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature**. Chicago: American Society of Agricultural Engineer Meeting, Paper 85-2517, 1985.

HEIFIG, L.C. **Plasticidade da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em diferentes arranjos espaciais**. 2002. 85p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal**: grãos: safra 2007/2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 04 nov. 2010.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T.T. **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1968. v.2, p. 1-22.

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE BIODIVERSIDADE. **Dados climáticos da base de dados meteorológicos**: Estação convencional, estação automática, posto agrometeorológico – Área de Física e Meteorologia, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/posto.html>>. Acesso em: 10 set. 2012.

MAKKINK, G.F. Ekzamento de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.5, p.290-305, 1957.

MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; UNGARO, M.R.G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, n.1, p.1-6, 2000.

MARTINS, K.V. **Caracterização fisiológica e influência das folhas senescentes do estrato inferior na produtividade da cultura de soja**. 2011. 77p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MORAES, S.O. **Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada**. 1991. 141p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

MORAES, F.P.; COLLA, L.M. Alimentos funcionais e nutracêuticos: definições, legislação e benefícios à saúde. **Revista Eletrônica de Farmácia**, Goiânia, v.3, n.2, p.109-122, 2006.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v.A193, p.120-146, 1948.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PRIESTLEY, C.H.; TAYLOR, R.J. On the assessment of the surfasse heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v.100, n.2, p.81-92, 1972.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.3, p.217-223, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera**. 2^a ed. Barueri: Manole, 2012. 500p.

RIJTEMA, P.E.; ABOUKHALED, A. Crop water use. In: ABOUKHALED, A.; ARAR, A.; BALBA, A.M.; BISHAY, B.G.; KADRY, L.T.; RIJTEMA, P.E.; TAHER, A. **Research on crop water use, salt affected soils and drainage in the Arab Republic of Egypt**. Cairo, FAO Regional Office for the Near East, 1975. p.5-61.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p.133-137, 1998.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4^a ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soybeans & Oil Crops**. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov/topics/crops/soybeans-oil-crops/background.aspx>>. Acesso em: 27 set. 2012.

van DER PLOEG, M.J.; GOOREN, H.P.A.; BAKKER, G.; de ROOIJ, G.H. Matric potentials measurements by polymer tensiometers in cropped lysimeters under water-stressed conditions. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.7, n.3, p.1048-1054, 2008.

van GENUCHTEN, M.T. A Closed-Form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALVES, D.R.B. **Distribuição de nitrogênio e potássio na cultura de milho (*Zea mays* L.) aplicados via pivô central**. 2000. 99p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

AZEVEDO, B.M. **Evapotranspiração de referência obtida com a razão de Bowen, lisímetro de pesagem e equação de Penman-Monteith utilizando sistemas automáticos**. 1999. 81p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

BASSANTA, M. del V. **Modelo para estimativa do volume máximo de calda visando a aplicação foliar de produtos químicos na cultura de milho (*Zea mays* L.)**. 1999. 65p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

COSTA, F.M.P. **Severidade de *Phaeosphaeria maydis* e rendimento de grãos de milho (*Zea mays* L.) em diferentes ambientes e doses de nitrogênio**. 2001. 99p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

COSTA, F.M.P. **Crescimento e desenvolvimento do cafeeiro sob efeito da adubação nitrogenada**. 2006. 80p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C.; FOLEGATTI, M.V.; VILLA NOVA, N.A.; MAGGIOTTO, S.R.; PEREIRA, F.A.C. Substantiation of the daily FAO-56 reference evapotranspiration with data from automatic and conventional weather stations. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.2, p.251-257, 2002.

STORCK, L.; GARCIA, D.C.; LOPES, S.J.; ESTEFANEL, V. **Experimentação vegetal**. 2^a ed. Santa Maria: UFSM, 2006. 198p.

TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4^a ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. 944p.

APÊNDICE

APÊNDICE A

Figura 19 - Tensiômetro de polímero com disco de cerâmica contendo $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (1), uma membrana de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (2), uma cápsula de aço inoxidável (3), uma câmara de polímero (4), um transdutor de pressão (5), e um anel sintético (6). Fonte: Bakker et al. (2007)

ANEXO

ANEXO A

Tabela 3 - Valores médios diários observados de temperatura média do ar (Tmed, °C), máxima (Tmax, °C) e mínima (Tmin, °C), umidade relativa média do ar (UR, %), velocidade do vento medida a 2 m da superfície do solo (U_2 , $m s^{-1}$) e saldo de radiação ($MJ m^{-2} d^{-1}$), durante o período de 05/01/2012 a 10/05/2012

(Continua)

Data	Tmed °C	Tmax °C	Tmin °C	UR %	U_2 $m s^{-1}$	Rn $MJ m^{-2} d^{-1}$
05/01/2012	23,5	31,5	19,6	80,3	0,7	8,90
06/01/2012	24,0	31,9	18,8	84,4	1,0	10,74
07/01/2012	23,5	32,1	18,9	86,7	0,9	14,15
08/01/2012	23,2	30,6	18,5	87,2	1,2	12,09
09/01/2012	23,4	30,3	18,8	84,1	1,3	13,66
10/01/2012	21,54	24,4	18,9	99,7	0,7	2,01
11/01/2012	22,51	25,6	19,0	96,5	0,9	4,07
12/01/2012	24,48	28,7	18,1	83,4	1,3	11,95
13/01/2012	25,74	28,9	17,6	81,5	1,2	9,82
14/01/2012	23,47	28,5	20,4	89,3	2,1	5,59
15/01/2012	24,01	31,2	20,9	93,1	1,2	8,94
16/01/2012	23,52	29,2	19,9	97,7	0,7	7,77
17/01/2012	23,18	30,0	18,9	95,2	0,9	7,87
18/01/2012	23,36	28,7	18,8	93,5	0,9	8,50
19/01/2012	20,52	26,1	18,5	97,3	0,5	4,43
20/01/2012	21,22	27,5	19,3	97,7	1,0	5,60
21/01/2012	23,11	31,3	19,6	91,1	0,8	11,87
22/01/2012	23,58	31,5	19,5	94,1	0,7	9,27
23/01/2012	23,69	32,3	19,4	93,7	0,9	10,66
24/01/2012	23,86	30,2	19,5	93,5	0,9	9,87
25/01/2012	22,54	30,9	20,4	93,4	0,9	12,66
26/01/2012	22,70	27,8	19,1	98,3	1,5	5,10
27/01/2012	22,25	21,0	17,1	99,4	1,9	1,72
28/01/2012	21,98	25,9	16,2	92,6	1,2	5,46
29/01/2012	21,74	29,1	15,8	79,1	1,4	14,19
30/01/2012	23,23	30,0	14,7	70,0	1,1	15,35
31/01/2012	22,52	31,5	14,6	77,5	1,0	14,31
01/02/2012	22,96	33,4	17,6	77,6	0,6	13,87
02/02/2012	23,35	33,3	19,0	76,4	0,6	15,25
03/02/2012	23,80	33,9	20,4	71,4	0,4	13,61
04/02/2012	22,27	34,3	19,7	67,1	0,5	15,13
05/02/2012	18,77	34,2	20,4	64,6	0,8	15,79
06/02/2012	20,26	34,9	20,3	64,5	0,6	15,27
07/02/2012	22,17	36,3	18,8	64,8	0,6	14,87
08/02/2012	22,63	36,8	20,8	65,1	0,9	15,61
09/02/2012	23,09	37,1	21,0	68,8	0,9	14,86
10/02/2012	25,20	33,2	21,3	83,5	1,6	8,52
11/02/2012	25,74	29,7	19,9	93,4	1,0	7,95

Tabela 3 – Valores médios diários observados de temperatura média do ar (Tmed, °C), máxima (Tmax, °C) e mínima (Tmin, °C), umidade relativa média do ar (UR, %), velocidade do vento medida a 2 m da superfície do solo (U_2 , $m\ s^{-1}$) e saldo de radiação ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), durante o período de 05/01/2012 a 10/05/2012

(Continuação)

Data	Tmed °C	Tmax °C	Tmin °C	UR %	U_2 $m\ s^{-1}$	Rn $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
12/02/2012	27,21	29,1	19,6	99,0	0,7	7,97
13/02/2012	27,37	28,8	20,5	91,1	0,4	6,07
14/02/2012	27,42	32,6	18,4	86,3	0,8	13,87
15/02/2012	27,70	33,1	18,5	85,2	0,8	12,78
16/02/2012	27,95	32,7	19,6	79,9	1,2	13,10
17/02/2012	28,71	34,0	18,9	78,9	0,8	14,28
18/02/2012	28,66	33,4	19,9	76,3	0,6	13,17
19/02/2012	26,03	31,4	21,4	83,6	0,5	8,30
20/02/2012	23,98	31,9	20,2	92,6	0,7	8,04
21/02/2012	22,65	31,1	19,3	97,4	0,6	6,70
22/02/2012	24,00	30,1	20,3	93,2	0,7	9,06
23/02/2012	24,40	31,7	20,7	88,3	0,7	12,24
24/02/2012	24,33	33,0	20,7	89,3	0,7	12,85
25/02/2012	25,74	33,0	21,0	94,8	0,6	8,39
26/02/2012	25,40	33,4	21,2	92,8	0,6	9,44
27/02/2012	26,50	31,7	21,7	92,1	0,5	6,97
28/02/2012	26,33	35,3	20,5	75,4	0,6	15,37
29/02/2012	24,30	35,6	20,1	76,1	0,5	14,61
01/03/2012	22,18	35,5	22,3	73,6	1,0	13,98
02/03/2012	23,75	34,2	20,8	75,7	0,9	14,21
03/03/2012	25,19	33,5	20,3	88,9	1,1	9,45
04/03/2012	25,24	32,5	19,6	82,7	1,1	14,09
05/03/2012	24,49	33,0	19,7	76,0	1,3	13,72
06/03/2012	25,32	33,3	19,8	75,7	1,6	12,93
07/03/2012	24,59	32,6	18,6	71,3	1,5	13,31
08/03/2012	27,24	32,7	17,5	75,2	1,0	11,87
09/03/2012	27,64	34,0	18,6	72,8	1,2	13,87
10/03/2012	27,86	30,8	19,2	84,9	0,9	7,29
11/03/2012	26,78	30,4	19,3	86,9	0,5	11,94
12/03/2012	24,52	33,1	19,0	78,3	0,4	12,69
13/03/2012	25,41	32,0	19,8	86,5	1,0	9,97
14/03/2012	26,27	33,0	18,3	80,2	0,9	12,92
15/03/2012	26,04	31,8	20,7	88,0	1,1	9,82
16/03/2012	25,06	27,5	20,2	89,3	1,6	4,79
17/03/2012	24,77	27,9	19,0	78,3	2,8	7,91
18/03/2012	25,92	30,2	17,3	73,8	2,4	12,26
19/03/2012	23,68	31,2	15,6	75,1	0,8	11,62
20/03/2012	24,05	31,8	17,3	77,6	0,5	12,10
21/03/2012	25,49	32,3	17,5	80,6	0,5	9,32
22/03/2012	24,07	33,6	18,6	79,0	1,3	11,78

Tabela 3 – Valores médios diários observados de temperatura média do ar (Tmed, °C), máxima (Tmax, °C) e mínima (Tmin, °C), umidade relativa média do ar (UR, %), velocidade do vento medida a 2 m da superfície do solo (U₂, m s⁻¹) e saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹), durante o período de 05/01/2012 a 10/05/2012

(Continuação)

Data	Tmed °C	Tmax °C	Tmin °C	UR %	U ₂ m s ⁻¹	Rn MJ m ⁻² d ⁻¹
23/03/2012	25,38	27,3	19,5	93,9	1,3	7,08
24/03/2012	24,82	30,5	20,1	86,5	0,5	9,85
25/03/2012	23,45	32,0	18,7	81,6	0,5	12,36
26/03/2012	22,79	33,9	18,4	77,6	0,3	12,24
27/03/2012	22,79	29,6	21,5	91,2	0,7	5,16
28/03/2012	23,30	27,4	17,2	95,4	1,1	4,22
29/03/2012	24,08	30,5	14,6	83,5	0,8	9,97
30/03/2012	24,29	30,4	16,6	88,2	0,9	8,33
31/03/2012	25,61	30,2	17,4	83,1	1,2	9,51
01/04/2012	22,57	31,4	16,3	79,0	1,2	10,55
02/04/2012	24,33	31,6	16,5	79,1	1,1	10,00
03/04/2012	24,95	33,4	17,3	80,3	0,5	10,27
04/04/2012	26,19	33,1	18,6	78,8	0,8	9,94
05/04/2012	24,12	34,4	18,1	75,5	0,8	10,32
06/04/2012	21,83	32,3	20,3	80,8	1,1	8,91
07/04/2012	21,92	33,8	18,9	78,1	0,5	10,15
08/04/2012	22,40	32,4	18,6	86,5	0,7	6,92
09/04/2012	23,15	30,5	18,3	88,2	1,4	8,86
10/04/2012	23,22	29,8	20,4	84,1	0,9	5,57
11/04/2012	23,78	31,9	18,4	84,3	0,7	10,72
12/04/2012	24,36	32,2	19,8	88,5	0,5	9,10
13/04/2012	25,26	32,6	20,5	84,1	0,4	8,94
14/04/2012	25,95	32,1	20,9	82,5	0,8	7,55
15/04/2012	25,96	32,1	20,8	83,7	1,2	10,16
16/04/2012	25,68	29,1	19,1	83,2	2,6	7,74
17/04/2012	24,22	30,5	16,8	79,1	1,3	8,51
18/04/2012	23,08	31,1	16,3	82,4	1,0	7,93
19/04/2012	24,12	31,5	16,5	80,7	0,6	8,77
20/04/2012	24,58	30,1	17,9	88,5	0,5	5,00
21/04/2012	24,49	21,7	18,2	99,9	0,7	-0,84
22/04/2012	25,62	25,4	17,1	94,7	1,5	4,70
23/04/2012	25,86	28,8	15,4	85,9	1,1	8,18
24/04/2012	25,84	28,0	14,3	82,7	0,7	7,54
25/04/2012	23,40	30,7	14,8	84,1	0,5	8,92
26/04/2012	22,80	29,3	19,1	91,1	1,3	4,54
27/04/2012	22,77	28,9	19,6	92,8	1,2	5,72
28/04/2012	23,26	24,8	17,8	96,9	0,4	2,88
29/04/2012	23,02	22,2	17,5	102,6	0,9	0,41
30/04/2012	19,95	19,5	14,9	104,2	0,7	-0,08
01/05/2012	20,43	21,7	12,6	84,7	1,5	6,09

Tabela 3 – Valores médios diários observados de temperatura média do ar (Tmed, °C), máxima (Tmax, °C) e mínima (Tmin, °C), umidade relativa média do ar (UR, %), velocidade do vento medida a 2 m da superfície do solo (U_2 , $m\ s^{-1}$) e saldo de radiação ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), durante o período de 05/01/2012 a 10/05/2012

(Conclusão)

Data	Tmed °C	Tmax °C	Tmin °C	UR %	U_2 $m\ s^{-1}$	Rn $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
02/05/2012	21,27	24,2	10,0	86,0	1,9	6,80
03/05/2012	20,93	26,1	13,6	83,8	2,4	6,76
04/05/2012	22,27	28,0	13,5	79,2	0,5	7,53
05/05/2012	23,43	28,5	13,5	86,4	0,5	6,69
06/05/2012	23,27	27,8	13,8	83,9	1,2	7,11
07/05/2012	21,19	27,8	15,0	78,9	1,7	7,22
08/05/2012	19,49	28,4	16,2	79,5	1,2	6,46
09/05/2012	17,44	27,7	12,7	84,3	0,4	6,88
10/05/2012	19,7	29,1	12,6	85,2	0,5	5,74

Fonte: LEB, 2012