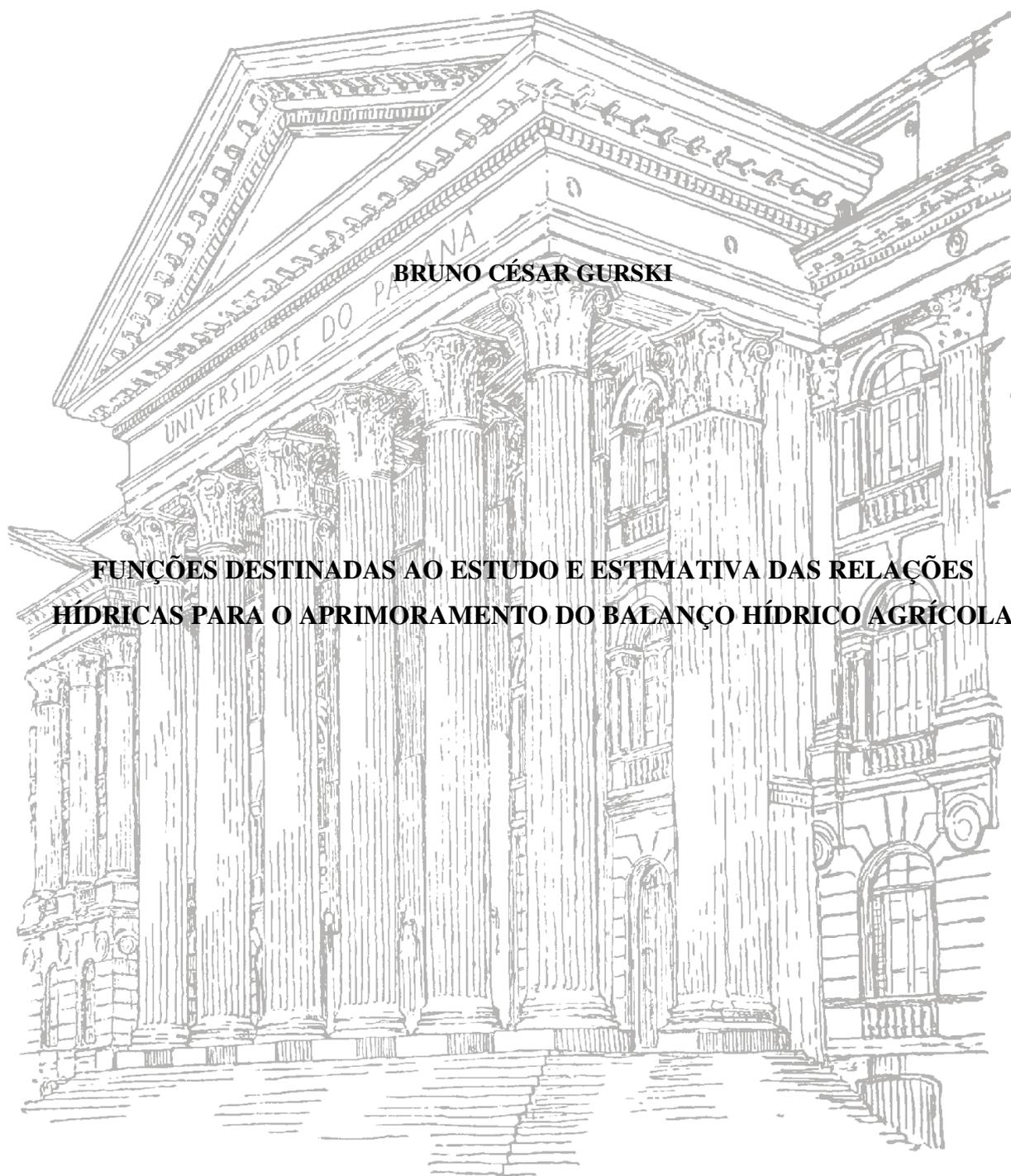


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ



BRUNO CÉSAR GURSKI

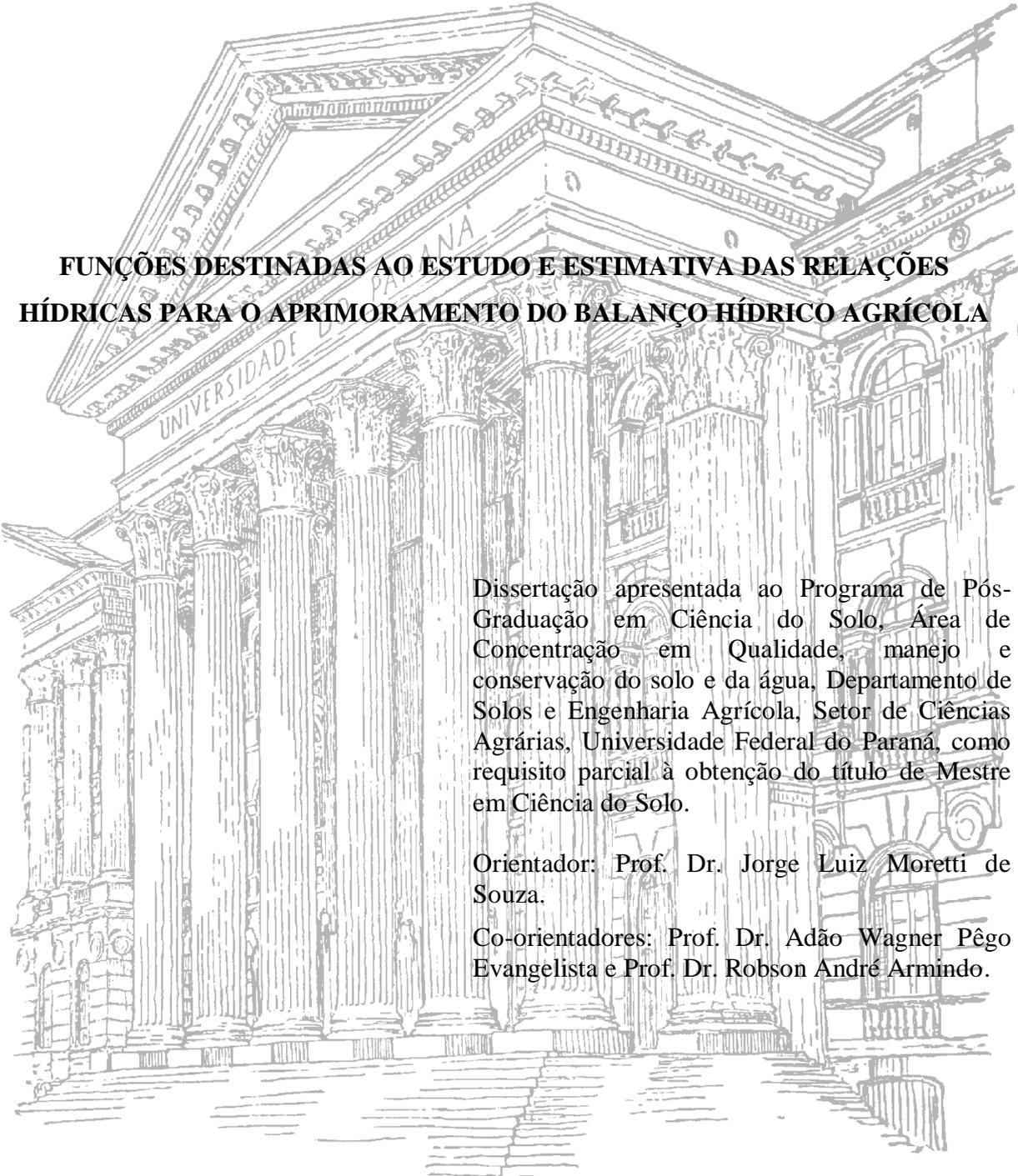
**FUNÇÕES DESTINADAS AO ESTUDO E ESTIMATIVA DAS RELAÇÕES
HÍDRICAS PARA O APRIMORAMENTO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA**

CURITIBA

2014

BRUNO CÉSAR GURSKI

**FUNÇÕES DESTINADAS AO ESTUDO E ESTIMATIVA DAS RELAÇÕES
HÍDRICAS PARA O APRIMORAMENTO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA**



Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Qualidade, manejo e conservação do solo e da água, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza.

Co-orientadores: Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista e Prof. Dr. Robson André Armindo.

CURITIBA

2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
 SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
 Mestrado e Doutorado



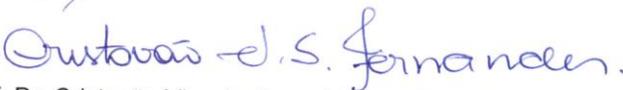
PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **BRUNO CÉSAR GURSKI**, intitulada: “**Funções destinadas ao estudo e estimativa das relações hídricas para o aprimoramento do balanço hídrico agrícola**”, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela “**APROVAÇÃO**” da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 21 de março de 2014.


 Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, Presidente


 Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista, Iº. Examinador


 Prof. Dr. Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes, IIº. Examinador


 Prof. Dr. Robson André Armindo, IIIº. Examinador

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por ter me concedido sabedoria, disposição e saúde para que eu pudesse chegar até aqui, sem qualquer tipo de impedimento.
- À minha família: pais, irmão, avós e namorada pelo apoio, incentivo e me ajudarem em todos os momentos de estudo.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade em cursar o mestrado e realizar este trabalho.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, pela amizade, ensinamentos, auxílio, ideias, sugestões e críticas ao bom andamento deste trabalho, minha formação e minha vida pessoal.
- Aos autores que tiveram os seus dados, funções e modelos utilizados na metodologia, sem os quais a presente dissertação não poderia ser desenvolvida: Ana Rita Costenaro Parizi, Cleomar César Hermes, Durval Dourado Neto, Emílio Sakai, Mamor Fujiwara, Euro Roberto Detomini, Fernando César Moura de Andrade, Flávio Bussmeyer Arruda, Gerson Araújo de Medeiros, Jorge Luiz Moretti de Souza, José M. Soares, Kharyn de Freitas Fezer, Luiz C. Silva, Luiz Fernando Druzina Massignan, Magna S. B. de Moura, Newton Roberto Boni, Oswaldo Teruyo Ido, Paulo Augusto Manfron, Paulo Eugênio Pachechenik, Paulo Leonel Libardi, Ricardo de Sousa Mendes, Robson André Armindo, Sandro Luís Petter Medeiros, Sérgio Zolnier, Tantravahi V. R. Rao, Thieres G. F. da Silva, Vinícius J. S. Vieira, Walter G. F. Júnior.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, sem o qual não seria possível a conclusão da dissertação.
- Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e outros programas, por seus valiosos ensinamentos que nos inspiram e fazem sempre querer continuar e melhorar.
- Aos meus colegas e amigos da turma de mestrado e doutorado dos anos de 2011, 2012 e 2013 que muito colaboraram para a conclusão deste trabalho.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- $\Delta A_{L(BHA)}$ – variação do armazenamento de água no solo no balanço hídrico agrícola
- $\Delta A_{L(BHS)}$ – variação do armazenamento de água no solo no balanço hídrico do solo
- A_L – armazenamento de água no solo
- BHA – balanço hídrico agrícola
- BHS – balanço hídrico do solo
- CAD – capacidade de água disponível no solo
- DAP – dias após plantio
- EAM – erro absoluto médio
- EM – erro médio
- ER – evapotranspiração real
- ER_{BHA} – evapotranspiração real do balanço hídrico agrícola
- ER_{BHS} – evapotranspiração real do balanço hídrico do solo
- ETc – evapotranspiração da cultura
- ETo – evapotranspiração de referência
- GDA – graus-dia acumulado
- J – dias julianos
- kc – coeficiente de cultivo
- kc_A – coeficiente de cultivo recomendado por Allen et al. (1998)
- kc_{DK} – coeficiente de cultivo recomendado por Doorenbos & Kassan (1979)
- kc_m – coeficiente de cultivo medido
- $kc(DAP)$ – coeficiente de cultivo em função de dias após plantio
- $kc(DAP)_A$ – coeficiente de cultivo em função de dias após plantio obtido de Allen et al. (1998)
- $kc(DAP)_{DK}$ – coeficiente de cultivo em função de dias após plantio obtido de Doorenbos & Kassan (1979)
- $kc(DAP)_k$ – coeficiente de cultivo em função de dias após plantio obtido de dados climáticos
- $kc(DAP)_m$ – coeficiente de cultivo em função de dias após plantio obtido de kc_m
- P – precipitação
- p – fração de água disponível no solo
- $p(ETc)_A$ – fração de água disponível em função da ETc proposta por Allen et al. (1998)
- $p(ETc)_{DK}$ – fração de água disponível em função da ETc proposta por Doorenbos & Kassan (1979)
- z – profundidade efetiva do sistema radicular

z_m – profundidade efetiva do sistema radicular medida

$z(DAP)_B$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos dias após plantio proposta por Borcioni (2008)

$z(DAP)_{BG}$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos dias após plantio proposta por Borg & Grimes (1986)

$z(DAP)_S$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função de dias após plantio proposta por Schouwenaars (1988)

$z(GDA)_B$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos graus-dia acumulado proposta por Borcioni (2008)

$z(GDA)_{DV}$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos graus-dia acumulado proposta por Dourado Neto & Van Lier (1991)

$z(J)_A$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função do dia juliano proposta por Allen et al. (1998)

$z(J)_{CD}$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função do dia juliano proposta por Campbell & Diaz (1988)

$z(kc)_A$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função do coeficiente de cultivo proposta por Allen et al. (1998)

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	viii
GENERAL ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
LITERATURA CITADA	5
CAPÍTULO 1 – FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE CULTIVO DIÁRIO DE CULTURAS AGRÍCOLAS	7
RESUMO	7
ABSTRACT	8
1.1 INTRODUÇÃO	9
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	10
1.2.1 Culturas avaliadas e valores medidos e recomendados de coeficiente de cultivo (kc) ..	10
1.2.2 Coeficiente de cultivo estimados em função de dias após o plantio: $kc(DAP)$	12
1.2.2.1 Obtenção das funções $kc(DAP)_m$, $kc(DAP)_{DK}$ e $kc(DAP)_A$	12
1.2.2.2 Obtenção das funções $kc(DAP)_k$	12
1.2.3 Análise da resposta das funções estabelecidas e ajustadas	15
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
1.3.1 Funções $kc(DAP)$ obtidas para as culturas analisadas	16
1.3.2 Avaliação estatística dos valores de kc estimados com as funções.....	20
1.3.3 Considerações gerais referente a utilização do kc e $kc(DAP)$ diário na agricultura.....	22
1.4 CONCLUSÕES	23
1.5 LITERATURA CITADA	24
CAPÍTULO 2 – FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE EFETIVA DO SISTEMA RADICULAR E FRAÇÃO DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO	26
RESUMO	26
ABSTRACT	27
2.1 INTRODUÇÃO	28
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	29
2.2.1 Culturas, locais e tipos climáticos	29
2.2.2 Modelos de estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular (z)	31
2.2.3 Funções para estimar o valor da fração de água disponível (p) do solo.....	33
2.2.4 Estimativa da evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura	34
2.2.5 Análise da resposta das funções testadas e ajustadas de z e fração p	35
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
2.3.1 Avaliação dos modelos de estimativa da z	35
2.3.2 Análise estatística dos valores estimados de z	39
2.3.3 Avaliação das funções de estimativa diária da fração p	41
2.4 CONCLUSÕES	44
2.5 LITERATURA CITADA	44
CAPÍTULO 3 – APERFEIÇOAMENTOS PARA ESTIMATIVA DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA DO <i>Pinus taeda</i> L. EM TELÊMACO BORBA-PR	46
RESUMO	46
ABSTRACT	47
3.1 INTRODUÇÃO	48
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	49
3.2.1 Caracterização da área de estudo	49

3.2.2 Procedimentos para amostragem do solo	51
3.2.3 Balanço hídrico do solo (BHS)	51
3.2.4 Balanço hídrico agrícola (BHA)	55
3.2.4.1 Evapotranspiração de referência (ET_o)	55
3.2.4.2 Evapotranspiração da cultura (ET_c) e coeficiente de cultivo (k_c).....	56
3.2.4.3 Capacidade de água disponível (CAD), água disponível no solo (AD) e fração de água disponível no solo (p).....	57
3.2.4.4 Armazenamento de água no solo (A_L)	58
3.2.5 Avaliação das componentes de saída do balanço hídrico agrícola	58
3.3.1 Precipitação e evapotranspiração de referência	58
3.3.2 Tendência da variação do armazenamento de água no solo (ΔA_L) e evapotranspiração real (ER)	59
3.3.2 Análise estatística da variação do armazenamento de água no solo (ΔA_L) e evapotranspiração real (ER)	65
3.4 CONCLUSÕES	69
3.5 LITERATURA CITADA	70
CONCLUSÃO GERAL	73
CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
APÊNDICE 1	74
APÊNDICE 2	78
APÊNDICE 3	79
APÊNDICE 4	80
APÊNDICE 5	85
APÊNDICE 6	86

FUNÇÕES DESTINADAS AO ESTUDO E ESTIMATIVA DAS RELAÇÕES HÍDRICAS PARA O APRIMORAMENTO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA

Autor: Eng^o Agr. Bruno César Gurski

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

RESUMO GERAL

A água é o recurso natural mais intensamente utilizado pelo homem na atualidade e a agricultura o setor que mais consome água doce no mundo. O balanço hídrico agrícola (BHA) consiste na determinação da necessidade ou disponibilidade hídrica real aos cultivos agrícolas. Apesar de excelente ferramenta de planejamento, questões referentes às suas componentes de entrada, como coeficiente de cultivo (kc), profundidade efetiva do sistema radicular (z) e fração de água disponível no solo (p) necessitam de aperfeiçoamentos. Teve-se por objetivo no presente trabalho estabelecer e avaliar funções e modelos destinados ao estudo e determinação das relações hídricas para melhorar as estimativas das componentes do balanço hídrico agrícola. Para tanto, o trabalho foi estruturado em três capítulos: Capítulo 1 Funções para estimativa do coeficiente de cultivo diário de culturas agrícolas; Capítulo 2 – Funções para estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular e fração de água disponível no solo; Capítulo 3 – Aperfeiçoamentos para estimativa do balanço hídrico agrícola do *Pinus taeda* L. em Telêmaco Borba-PR. A comparação entre as diferentes funções e modelos com valores medidos foi realizada empregando análise gráfica, coeficiente de determinação (R^2), índice “ d ” de concordância, índice “ c ” de desempenho, erro médio e erro absoluto médio. As funções de kc obtidas, que variam conforme os dias após plantio, melhoram a estimativa da evapotranspiração da cultura, por refletirem melhor as condições locais, em comparação com os valores de kc comumente utilizados na literatura. Não se encontrou um modelo de estimativa z que possa ser utilizado generalizadamente, no entanto, os fatores que mais a influenciam em diferentes tipos climáticos foram identificados, possibilitando o estabelecimento dos melhores modelos para a cana-de-açúcar, feijão e milho. O emprego de valores de kc e fração p diários melhoram a estimativa do BHA do *Pinus taeda*, tornando-o mais sensível às mudanças morfoclimáticas locais, porque possibilita melhor ajustamento aos valores do balanço hídrico do solo, refletidos nas componentes de saída, como evapotranspiração real e armazenamento de água no solo.

Palavras-chave: Coeficiente de cultivo; profundidade efetiva do sistema radicular; fração de água disponível no solo.

FUNCTIONS AND MODELS FOR STUDY AND ESTIMATE OF WATER RELATIONS FOR IMPROVEMENT AGRICULTURAL WATER BALANCE

Author: Agr. Eng^o Bruno César Gurski

Advisor: Teach. D.Sc. Jorge Luiz Moretti de Souza

GENERAL ABSTRACT

Water is the natural resource most intensively used by man today and agriculture the sector that consumes more freshwater in world. The agricultural water balance (AWB) consists in determining the need or real water availability to crops. However, questions concerning their input components as crop coefficient (kc), effective system root depth (z) and fraction of available soil water (p) require enhancements to improve estimates. This study aimed to establish and to evaluate functions and models for the study and determination of water relations to improve estimates of agricultural water balance components. To this end, the study was divided into three chapters: Chapter 1 – Functions to estimate the daily crop coefficient of agricultural crops; Chapter 2 – Functions to estimate the effective root system depth and fraction of available soil water; Chapter 3 – Enhancements to estimate crop water balance of *Pinus taeda* L. in Telêmaco Borba-PR. The comparison between the different functions and models with measured values was performed using graphical analysis, determination coefficient (R^2), index "d" of concordance, index "c" of performance, mean error and mean absolute error. The kc functions obtained which vary according to days after planting, improve estimated crop evapotranspiration, by better reflect local conditions, compared with kc values commonly used in literature. Not found a model for estimating z that can be widely used, however, the factors that influence it in different climate types were identified, allowing the establishment of best models for sugarcane, bean and corn. The use of daily kc and fraction p values improve estimate of AWB of *Pinus taeda*, making it more responsive to local morphoclimatic changes, because it allows better adjustment to the values of soil water balance, reflected in output components such as real evapotranspiration and soil water storage.

Key-words: Crop coefficient; root system effective depth; fraction of available soil water.

INTRODUÇÃO GERAL

A água é elemento imprescindível para o desenvolvimento de todas as formas de vida no planeta, sendo o recurso natural mais intensamente utilizado pelo homem na atualidade (Reichardt, 1990). O uso global de água aumenta devido a uma série de fatores, como o crescimento populacional e econômico, mudanças nos estilos de vida, novas tecnologias e expansão dos sistemas de produção. O setor que mais consome água é a agricultura, por meio principalmente da irrigação, respondendo por cerca de 70% do uso da água doce do mundo (United Nations, 2003).

Apesar disso, a eficiência do uso da água pelas plantas é muito baixa. O retorno econômico da água empregada pela indústria, por exemplo, é aproximadamente duzentas vezes maior que a utilizada na irrigação. No entanto, a produção de alimentos é necessária e permanente, o que impulsiona a busca científica para compreender melhor o ciclo hidrológico e encontrar alternativas que maximizem a eficiência do uso da água na agricultura (Selborne, 2001).

O ciclo hidrológico agrícola é estudado por meio do balanço hídrico, que consiste na contabilização das entradas e saídas de água em dado volume de solo vegetado em determinado tempo, fornecendo a quantidade de água disponível no sistema. O balanço hídrico segue o princípio da conservação de massa, ou seja, o somatório das entradas e saídas deve ser nulo (Pereira et al., 1997; Reichardt & Timm, 2004). As aplicações do balanço hídrico são variadas, podendo ser utilizado para: planejamento das operações da atividade agropecuária, manejo de irrigação, previsão de safras, acompanhamento de mercado, indicador da influência do uso do solo sobre o funcionamento hidrológico em uma bacia hidrográfica, subsidiar a classificação da aptidão e capacidade de uso de terras, entre outros (Pereira et al., 1997; Souza & Gomes, 2008).

Dentre as componentes do balanço hídrico do solo (BHS), a variável armazenamento da água no solo pode ser estimada indiretamente por meio de evapotranspirômetros, lisímetros, tensiômetros, sondas, entre outros, que permitem estimar a quantidade de água no solo. Para realização do balanço hídrico do solo, geralmente faz-se necessário o uso de métodos que demandam precisão de medida e somente podem ser explorados completamente envolvendo maior quantidade de recursos financeiros e humanos (Reichardt & Timm, 2004).

Devido à complexidade e custo com mão de obra, a medida do armazenamento da água do solo para finalidades agrícolas muitas vezes é obtida aproximadamente em balanços

hídricos estimados, que consideram parâmetros do solo ou clima. Os modelos de simulação utilizados devem permitir a extrapolação do estudo do balanço hídrico para diversas regiões, e proporcionar eficiência aceitável para contribuir no planejamento agrícola (Pereira et al., 1997).

O balanço hídrico agrícola (BHA) é direcionado à determinação da necessidade ou disponibilidade hídrica real aos cultivos agrícolas, com o objetivo mais comum de quantificar o volume de água a ser reposto ao solo por intermédio de irrigação, para manutenção da umidade do solo cultivado próximo da capacidade de campo.

Com o advento da informática, as dificuldades operacionais, principalmente para a solução de equações complexas para o tratamento, associação e utilização de grandes sequências de dados deixaram de ser obstáculo. A evolução das técnicas de programação e o surgimento de linguagens de programação mais acessíveis, associadas à grande capacidade de processamento dos computadores, permitiram a evolução da modelagem e o desenvolvimento e aprimoramento de modelos de estimativa de balanços hídricos. Assim, o monitoramento da água no solo pode ser realizado atualmente com uma série de modelos matemático-estatísticos que possibilitam a contabilização das entradas e saídas de água no solo (Ahuja et al., 2008; Souza & Gomes, 2008).

O mais conhecido e citado modelo para o cálculo do balanço hídrico com finalidade agrícola foi descrito por Thornthwaite & Mather (1955), o qual tem sido utilizado por diversos autores, empregando a metodologia original ou adaptada (Souza & Frizzone, 2007; Souza & Gomes, 2008).

Pereira et al. (1997) descreve que o modelo proposto por Thornthwaite & Mather (1955) possibilita o monitoramento das entradas e saídas de água no solo de forma eficiente, indicando os períodos prováveis de excedentes e deficiência hídricas, ideal para trabalhos de macro escala. Entretanto, devido à simplificação, alguns trabalhos necessitam modificações, uma vez que originalmente o modelo trabalha com médias mensais de temperatura e precipitação. Diversos autores têm realizado adaptações na metodologia, utilizando dados diários ou agrupamentos menores (semana, decêndio e quinzena), descartando valores médios para algumas componentes do balanço hídrico (Souza & Gomes, 2007; Araújo et al., 2009; Adamuchio, 2011; Scheraiber, 2012).

Utilizando a metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955), Souza (2008) desenvolveu um modelo computacional para o cálculo do BHA denominado “*MORETTI* –

Módulo: Balanço hídrico sequencial (Periodicidade: 1, 5, 7, 10 15 e 30 dias), Versão 1.0”. O modelo consiste em um balanço hídrico sequencial que necessita de dados de precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_o), coeficiente de cultivo (kc), fração de água disponível no solo (p) e capacidade de água disponível no solo (CAD). Empregando valores pré-definidos de CAD , a metodologia permite estimar as componentes do balanço hídrico (ET_c – evapotranspiração da cultura, A_L – armazenamento de água no solo, ER – evapotranspiração real, Def – deficiência hídrica, Exc – excedente hídrico e I – irrigação) sem a necessidade de medidas diretas do solo. O modelo foi extraído e melhorado a partir do modelo original realizado por Souza (2001) e Souza (2005), sendo inúmeros os trabalhos realizados com o seu auxílio (Souza & Frizzone, 2003; Souza & Frizzone, 2007; Souza & Gomes, 2007; Souza & Gomes, 2008; Araujo et al., 2009; Adamuchio, 2010; Scheraiber, 2012; Gerstemberger, 2012; Jerszurki, 2013).

Embora o modelo de Souza (2008) tenha obtido bons resultados em uma série de análises e trabalhos, seu desenvolvimento não está completo. Pereira et al. (1997) estabelecem que variações da cultura, solo e clima da região de interesse devem ser consideradas, bem como deve-se atentar aos critérios técnicos que influenciam o sistema solo-água-planta-atmosfera. Neste contexto, inúmeras questões referentes à variação dos estádios de desenvolvimento da cultura, kc , profundidade efetiva do sistema radicular e fração p ainda necessitam ser aperfeiçoados. Adaptações e variações no balanço hídrico são necessárias devido aos cultivos agrícolas possuírem sistemas radiculares, estádios de desenvolvimento e solos que promovem variação contínua na CAD , sendo importante considerar dados de entrada com menor periodicidade.

O kc é uma relação entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e a evapotranspiração de referência (ET_o), utilizada para estimar a restrição hídrica imposta à cultura pelo sistema solo-atmosfera. A estimativa do balanço hídrico com um kc pré-determinado por Doorenbos & Kassam (1979) ou Allen et al. (1998) pode ser equivocada se as condições do local onde a cultura está implantada forem diferentes da proposta por estes autores, estimando erroneamente o real consumo de água pela cultura. Além disso, quando há variação na taxa de crescimento da cultura, entre locais e entre anos sucessivos, a curva do kc pode ser diferente (Leal & Sedyima, 2004).

A CAD consiste na capacidade de água disponível no solo. A princípio, existe água disponível para a planta até o solo atingir o ponto de murcha permanente, mas a quantidade de água removida pela cultura é significativamente reduzida antes de alcançar esse ponto. A

quantidade de água disponível que uma cultura pode extrair da zona radicular sem experimentar estresse hídrico é chamada de fração p . Pela dificuldade de mensuração, inúmeras vezes a fração p é considerada constante ao longo do desenvolvimento das culturas, sendo seu valor pré-estabelecido; mas sabe-se que ela é altamente influenciada pela ET_c ao longo do desenvolvimento das culturas (Allen et al., 1998).

A avaliação da distribuição do sistema radicular de uma cultura é fundamental para o desenvolvimento de práticas racionais de manejo agrícola que visam à otimização da produtividade, mas os modelos para estimativa do crescimento radicular presentes na literatura ainda são muito escassos. Isso se deve ao fato de existirem inúmeros fatores que influenciam o crescimento das raízes (Borcioni, 2008).

O crescimento radicular é muito influenciado pelas condições climáticas e, como sua variação é muito grande, a medida é bastante difícil. Por isso, quando realizada, deve incluir pelo menos 95% do sistema radicular, em termos de profundidade e volume de exploração (Reichardt & Timm, 2004). Atualmente, por conveniência, para a estimativa do balanço hídrico são atribuídos valores constantes de profundidade do sistema radicular das culturas, mas sabe-se que ela varia ao longo das fases de desenvolvimento das culturas, de acordo com o solo e condições climáticas da região (Figura 1).

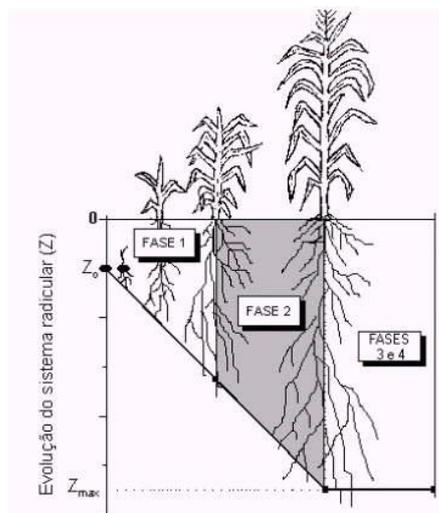


Figura 1 – Tendência do crescimento da profundidade efetiva do sistema radicular (z) de uma cultura agrícola ao longo do tempo (Fancelli & Dourado Neto, 2000).

Considerando diversas culturas e tipos climáticos, teve-se por objetivo no presente trabalho estabelecer e avaliar funções e modelos destinados ao estudo e determinação das relações hídricas – relações: valores de coeficiente de cultivo (kc) com dias após plantio

(*DAP*); valores de fração de água disponível no solo (*p*) com *ETc*; e, profundidade efetiva do sistema radicular (*z*) e *DAP* – para melhorar as estimativas de componentes do balanço hídrico agrícola.

O presente trabalho foi estruturado e encontra-se subdividido em três capítulos:

Capítulo 1 – Ajustamento de funções para estimativa do coeficiente de cultivo diário de culturas agrícolas;

Capítulo 2 – Ajustamento de funções para estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular e fração de água disponível no solo;

Capítulo 3 – Aperfeiçoamentos para estimativa do balanço hídrico agrícola do *Pinus taeda* L. em Telêmaco Borba-PR.

LITERATURA CITADA

ADAMUCHIO, J. G. Respostas de um balanço hídrico devido às periodicidades e equações de estimativa do armazenamento da água no solo. Curitiba, 2011. 253p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

AHUJA, L. R.; REDDY, V. R.; SASEENDRAN, S. A. & QIANG, Y. Response of crops to limited water: understanding and modeling water stress effects on plant growth processes. Madison, WI: American Society of Agronomy: Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2008, 436 p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. 1.ed. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p.

ARAÚJO, M. A.; SOUZA, J. L. M.; BRONDANI, G. E. & PAULETTI, V. Sistemas de manejo e relações hídricas do solo na produtividade da cultura da soja, em Ponta Grossa - Paraná. Scientia Agraria, v. 10, n. 5, p. 403-412, 2009.

BORCIONI, E. Equações de estimativa do crescimento do sistema radicular e produção de fitomassa de alface hidropônica. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós- Graduação em Agronomia, RS, 2008.

DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. Yield response to water. Roma: FAO. (Irrigation and Drainage Paper, 33). 1979. 193p.

FANCELLI, A. L. & DOURADO NETO, D. Produção de milho. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360p

GERSTEMBERGER, E. Caracterização das relações hídricas e ajuste de modelos de produção água-cultura para cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na região de Paranavaí-PR. Curitiba, 2012. 102p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

JERSZURKI, D. Caracterização das relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda* no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Curitiba, 2013. 90p. Dissertação (Mestrado

em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

LEAL, B. G. & SEDIYAMA, G. C. Modelo matemático para determinação da curva do coeficiente de cultura, *Kc*. Engenharia na Agricultura, v.12, n.2, 124-133, 2004.

PEREIRA, A.R.; VILA NOVA, N. A. & SEDIYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: ESALQ. 1997. 183p.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1990. 188p.

REICHARDT, K. & TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478p.

SCHERAIBER, C. F. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola. Curitiba, 2012. 153p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

SELBORNE, L. A ética do uso da água doce: um levantamento. Brasília: UNESCO, 2001. 80p.

SOUZA, J. L. M. Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro. Piracicaba-SP, Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2001.

SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI – Módulo: Balanço hídrico climatológico decenal irrigacionista, Versão 2.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2005.

SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI - Módulo balanço hídrico sequencial (periodicidade: 1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias), Versão 1.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2008.

SOUZA, J. L. M. & FRIZZONE, J. A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada. I. Simulação do balanço hídrico e do custo com água. Acta Scientiarum Agronomy, v. 25, n. 01, p. 103-112, 2003.

SOUZA, J. L. M. & FRIZZONE, J. A. Simulação do balanço hídrico para a cultura do cafeeiro nas regiões de Lavras e Uberlândia. Scientia Agraria, v. 8, n. 3, p. 291-301, 2007.

SOUZA, J. L. M. & GOMES, S. Avaliação e desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decenal irrigacionista. Acta Scientiarum Agronomy, v. 29, n. 04, p. 433-443, 2007.

SOUZA, J. L. M. & GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decenal em função da capacidade de água disponível no solo. Acta Scientiarum Agronomy, v. 30, n. 2, p. 153-163, 2008.

THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. Centerton: Laboratory of Climatology, 1955.

UNITED NATIONS. Water for people, water for life. The United Nations World Water Development Report, UNESCO-World Water Assessment Programme and Berghahn Books, Paris. 2003.

CAPÍTULO 1 – FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE CULTIVO DIÁRIO DE CULTURAS AGRÍCOLAS

RESUMO

A metodologia envolvendo a utilização de coeficiente de cultivo (kc) para encontrar a evapotranspiração da cultura (ET_c) é muito utilizada à várias décadas, mas apresenta problemas, principalmente quando os valores de kc utilizados não foram determinados para o período e região estudados. Diversos estudos foram realizados comparando valores de kc recomendados na literatura com valores de kc experimentais locais, e verificou-se para muitas culturas que os valores apresentam grandes diferenças. Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar funções que relacionem valores de kc com dias após plantio (DAP), para diferentes culturas e tipos climáticos, para obtenção de valores diários de $kc(DAP)$. As culturas avaliadas foram o amendoim, cana-de-açúcar, feijão, milho, soja e *Pinus taeda*. Valores de $kc(DAP)$ obtidos com diferentes funções foram comparados com kc medidos no campo. A avaliação foi realizada empregando análise gráfica, regressão linear, coeficiente de determinação (R^2), índice “ d ” de desempenho, índice “ c ” de concordância, erro médio e erro absoluto médio. As funções do tipo $kc(DAP)$ obtidas melhoram a estimativa da evapotranspiração da cultura, por refletirem melhor as condições locais, referentes aos diferentes tipos de cultura, solo e clima, em comparação com os valores de kc comumente utilizados na literatura. O uso das funções $kc(DAP)$ é uma alternativa para aumentar a eficiência no uso da água em engenharia de irrigação, por possibilitar melhor quantificação do uso da água pelas plantas no tempo. Não foi possível estabelecer funções $kc(DAP)$ genéricas, independente da cultura avaliada.

Palavras-chave: Relações hídricas, evapotranspiração da cultura, dias após plantio.

CHAPTER 1 – FUNCTIONS FOR ESTIMATING DAILY CROP COEFFICIENT OF AGRICULTURAL CROPS

ABSTRACT

The methodology involving crop coefficient (kc) to find crop evapotranspiration (ET_c) is widely used for several decades, but has problems, particularly when the kc values used were not determined for period and region studied. Several studies have been performed comparing values of kc recommended in literature with experimental data locations and occurred for many crops that kc values differ significantly. This study aimed to determine functions that relate kc values with days after planting (DAP), for different cultures and climatic types, to obtain daily values of $kc(DAP)$. The cultures evaluated were peanut, sugarcane, bean, corn, soybean and *Pinus taeda*. Values of $kc(DAP)$ obtained with different functions were compared with field measured kc values. The evaluation was performed using graphical analysis, determination coefficient (R^2), index "d" of performance, index "c" of agreement, mean error and absolute mean error. The functions of type $kc(DAP)$ obtained improve accuracy of estimated crop evapotranspiration, by better reflect the local conditions, concerning different crop types, soil and climate, in comparison with kc values commonly used in literature. The use of functions $kc(DAP)$ is an alternative to increase the efficiency of water use in irrigation engineering, by allowing better quantification of water use by plants in time. It was not possible to establish generic $kc(DAP)$ functions, independent of culture assessed.

Key-words: Water relations, crop evapotranspiration, days after planting.

1.1 INTRODUÇÃO

O coeficiente de cultivo (kc) é largamente utilizado em análises envolvendo relações hídricas de cultivos agrícolas, permitindo estimar a evapotranspiração da cultura (ETc) para ser empregada em várias atividades de engenharia de água e solo, como o cálculo do balanço hídrico agrícola. No entanto, a obtenção de valores de kc diários necessita de instalações especiais e de alto custo para a medida da ETc (evapotranspirômetros ou lisímetros).

Como agravante, mesmo quando determinado diariamente, os dados experimentais de kc geralmente são publicados de forma agrupada, em estádios de desenvolvimento da cultura, dificultando a utilização, principalmente quando se pretende realizar rotinas computacionais em que a sua variação diária (temporal) é importante para a precisão dos resultados. O ajuste de funções para descrever a tendência dos valores de kc ao longo do ciclo da cultura é uma ótima alternativa para apresentação e utilização de dados experimentais de kc , porém, poucos autores se preocupam em determinar e disponibilizar esse tipo de avaliação.

Doorenbos & Kassam (1979) e Allen et al. (1998) estabeleceram experimentalmente valores de kc para diversas culturas agrícolas, obtendo os estádios de desenvolvimento baseando-se no tempo, na forma de dias após plantio (DAP). Desde então, esses valores vêm sendo utilizados generalizadamente. No entanto, diversos estudos foram realizados comparando valores de kc utilizados da literatura com valores experimentais locais, e verificou-se para muitas culturas que os valores de kc apresentaram grandes diferenças (Liu & Luo, 2010; Zhang et al., 2011; Arif et al., 2012; Zapata et al., 2012).

Na estimativa do balanço hídrico agrícola (BHA), o uso de um kc equivocado resulta em distorções nos valores de ETc e, conseqüentemente, no armazenamento de água no solo (A_L), porque as características edafoclimáticas do local podem ser diferentes do local de referência. Além disso, as culturas podem ter ciclos diferentes e pode haver diversas épocas de plantio e diferentes cultivares (Gadioli et al., 2000; Setiyono et al., 2007; Lima & Silva, 2008; Zhang et al., 2011; Toledo et al., 2010). Como alternativa para o problema pode-se estabelecer valores diários de kc por meio de uma curva de variação. Vários modelos matemáticos já foram analisados para verificar seu ajustamento aos valores de kc . Dentre os modelos testados, o polinômio de terceiro

grau geralmente apresentou os menores valores de erros relativos para os estádios de desenvolvimento de algumas culturas (Leal & Sedyima, 2004).

Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente trabalho determinar funções que relacionem valores de kc com DAP , para diferentes culturas e tipos climáticos, para obtenção de valores diários de $kc(DAP)$ ao longo dos estádios de desenvolvimento das culturas.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Culturas avaliadas e valores medidos e recomendados de coeficiente de cultivo (kc)

As culturas avaliadas no presente trabalho foram escolhidas para abranger diferentes ciclos (anual, semi-perene e perene), sendo: amendoim, cana-de-açúcar, feijão, milho, soja e *Pinus taeda*.

Como referencial, por serem muito empregados na literatura, foram utilizados os valores de kc recomendados por Doorenbos & Kassan (1979) e Allen et al. (1998) (Tabelas A.1.1 e A.1.2 do Apêndice 1) para os estádios de desenvolvimentos das culturas: denominados no presente trabalho de kc_{DK} e kc_A , respectivamente. Os valores de coeficiente de cultivo medidos (kc_m) foram obtidos na literatura, em trabalhos científicos que estudaram as relações hídricas de determinada cultura (Tabela 1.1). Maiores informações sobre os dados experimentais obtidos encontram-se dispostos no Apêndice 1 (Tabelas A.1.3 a A.1.8).

Todos os valores de kc_m obtidos nos trabalhos científicos (Tabela 1.1) foram determinados com a relação:

$$kc_{mj} = \frac{ETc_j}{ETO_j}$$

Sendo: kc_{mj} – coeficiente de cultivo no j -ésimo período de desenvolvimento da cultura (adimensional); ETc_j – evapotranspiração da cultura no no j -ésimo período de desenvolvimento da cultura (mm período^{-1}); ETO_j – evapotranspiração de referência respectiva ao j -ésimo período de desenvolvimento da cultura (mm-período^{-1}).

Tabela 1.1 – Autores e caracterização da área experimental de procedência dos valores medidos de coeficiente de cultivo (k_{cm}).

Autoria	Cultura	Plantio	Local	Solo	----- Coordenadas geográficas -----			Tipo climático ⁽¹⁾	Medida da ET_c	Estimativa da ET_o	Periodicidade k_c (dias)
					S	W	Altitude (m)				
Silva & Rao (2006)	Amen-doim	10/01/2001	Rodelas-BA	Neossolo regolítico	08°50'	38°46'	270	BSwh	Evapotranspirômetro	Tanque Classe A	Estádios
Silva et al. (2012)	Cana-de-açúcar	19/06/2007	Juazeiro-BA	Vertissolo	09°28'07"	40°22'43"	386	BSwh	Calor latente	Penman-Monteith	Estádios
Medeiros et al. (2000)	Feijão	01/08/1994	Campinas-SP	Latossolo vermelho	22°52'	47°04'	685	Cfa	Evapotranspirômetro	Penman	Estádios
Detomini et al. (2009)	Milho	24/11/2005	Piracicaba-SP	Nitossolo eutroférico	22°41'30"	47°38'30"	546	Cwah	Lisímetro	Penman-Monteith	15
Mendes (2006)	Soja	01/11/2004	Brasília-DF	Latossolo vermelho amarelo	15°56'	47°56'	1080	Cwa	Tensiômetro	Penman	7
Pachechenik (2010) ⁽²⁾	<i>Pinus taeda</i>	23/09/2003	Telêmaco Borba-PR	Latossolo vermelho	24°13'19"	50°32'33"	700	Cfb	Umidade do solo	Penman-Monteith	7

⁽¹⁾ Obtido com a classificação de Köppen. ⁽²⁾ Pachechenik (2010) não determinou os valores de k_c , mas autorizou e disponibilizou dados experimentais que permitiram calcular os valores em um balanço hídrico do solo considerando os fluxos verticais.

1.2.2 Coeficiente de cultivo estimados em função de dias após o plantio: $kc(DAP)$

Os valores diários de coeficiente de cultivo, determinados em função de dias após plantio “ $kc(DAP)$ ” para cada cultura analisada, foram estimados a partir dos valores medidos (Apêndice 1, Tabelas A.1.3 a A.1.8) e recomendados por Doorenbos & Kassan (1979) e Allen et al. (1998) (Apêndice 1, Tabelas A.1.1 e A.1.2), em suas respectivas periodicidades.

1.2.2.1 Obtenção das funções $kc(DAP)_m$, $kc(DAP)_{DK}$ e $kc(DAP)_A$

As funções $kc(DAP)_m$ foram obtidas em análises de regressões polinomiais de 2° e 3° graus, entre valores de coeficiente de cultivo medido (kc_m) para cada cultura avaliada *versus* dias após plantio (DAP) (Apêndice 1, Tabelas A.1.3 a A.1.8). As funções $kc(DAP)_{DK}$ e $kc(DAP)_A$ também foram obtidas em análise de regressões polinomiais de 2° e 3° graus, entre valores médios de kc recomendados por Doorenbos & Kassan (1979) (kc_{DK}) e Allen et al. (1998) (kc_A), respectivamente, para cada cultura avaliada *versus* dias após plantio (DAP). As análises de regressão foram realizadas em planilha eletrônica, estabelecendo a condição de interseção em zero, com o polinômio:

$$kc(DAP) = a_0 + a_1 \cdot DAP + a_2 \cdot DAP^2 + a_3 \cdot DAP^3$$

Sendo: $kc(DAP)$ – coeficiente de cultivo obtido em função dos dias após plantio (adimensional); DAP – dias após o plantio (dia); a_0 , a_1 , a_2 e a_3 – coeficientes da função.

1.2.2.2 Obtenção das funções $kc(DAP)_k$

A metodologia consistiu no estabelecimento das equações de coeficiente de cultivo $kc(DAP)_k$ (Figura 1.1, Equações 1 a 4), conforme os valores de kc_{ini} , kc_{med} e kc_{fin} estimados com as Equações 5 a 8 propostas por Allen et al. (1998), adaptadas às condições climáticas do local estudado.

Primeiramente se estabeleceu a duração dos quatro estádios de desenvolvimento (inicial, desenvolvimento, intermediário, final) das culturas analisadas, de acordo com o ciclo e condições edafoclimáticas do local em que os valores de kc_m foram medidos. Em seguida, com os valores de kc_{ini} , kc_{med} e kc_{fin} (Figura 1.1, Tabela A.1.2), recomendados por Allen et al. (1998) para cultivos sem estresse hídrico e bem manejados em climas subúmidos, iniciou-se o processo de ajustamento conforme descrito a seguir:

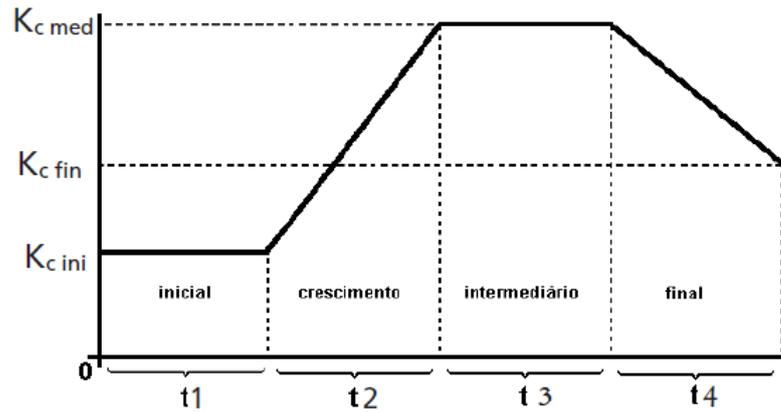


Figura 1.1. Tendência do coeficiente de cultivo ao longo dos estádios de desenvolvimento de uma cultura agrícola não perene (Allen et al., 1998).

(a) Determinação da função $kc(DAP)_k$ de Allen et al. (1998):

Estabeleceu-se as equações de coeficiente de cultivo (Figura 1.1, Equações 1 a 4) a partir dos valores kc_{ini} , kc_{med} e kc_{fin} ajustados nos subitens (b) e (c):

$$kc(DAP)_k = kc_{ini} \quad \text{para } DAP_i \leq DAP_1 \quad (1)$$

$$kc(DAP)_k = kc_{ini} + \frac{kc_{med} - kc_{ini}}{DAP_2 - DAP_1} (DAP_i - DAP_1) \quad \text{para } DAP_1 < DAP_i \leq DAP_2 \quad (2)$$

$$kc(DAP)_k = kc_{med} \quad \text{para } DAP_2 < DAP_i \leq DAP_3 \quad (3)$$

$$kc(DAP)_k = kc_{fin} + \frac{kc_{med} - kc_{fin}}{DAP_4 - DAP_3} (DAP_4 - DAP_i) \quad \text{para } DAP_3 < DAP_i \leq DAP_4 \quad (4)$$

Sendo: $kc(DAP)_k$ – coeficiente de cultivo obtido em função dos dias após plantio (adimensional); kc_{ini} , kc_{med} e kc_{fin} – coeficiente de cultivo inicial, médio ou final (adimensional); DAP_i – dias após o plantio no i -ésimo dia (dia); DAP_1 , DAP_2 , DAP_3 , DAP_4 – dias após o plantio do último dia dos estádios de desenvolvimento inicial, crescimento, intermediário e final, respectivamente (Figura 1.1).

(b) Processo de ajustamento do kc_{ini}

O estágio de desenvolvimento inicial ocorre predominantemente em forma de evaporação. Por isso, a estimativa do kc_{ini} considerou a umidade e frequência de umedecimento do solo no período (Allen et al. 1998), conforme as equações:

$$kc_{ini} \leq 1,15 \quad (\text{condição inicial para que o ajuste possa ser realizado})$$

$$kC_{ini} = \frac{AET - (AET - AFE) \cdot \exp\left(\frac{-(t_w - t_1) \cdot Eso \cdot \left(1 + \frac{AFE}{AET - AFE}\right)}{AET}\right)}{t_w \cdot ETo} \quad \text{para } t_w \geq t_1 \quad (5)$$

$$kC_{ini} = \frac{Eso}{ETo} \quad \text{para } t_w < t_1 \quad (6)$$

Sendo: kC_{ini} – coeficiente de cultivo inicial (adimensional); AET – água evaporável total (mm); AFE – água facilmente evaporável (mm) (Apêndice 1, Tabela A.1.9); t_w – intervalo médio entre eventos de chuva (dias); t_1 – tempo para completar a primeira etapa (dias); Eso – índice potencial de evaporação (mm dia^{-1}); ETo – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

– Para o cálculo do t_w :

$$t_w = \frac{DAP_{ini}}{n_w + 0,5}$$

Sendo: DAP_{ini} – duração do estágio de desenvolvimento inicial (dias) (Tabela A.1.2); n_w – número de vezes que houve precipitação no estágio de desenvolvimento inicial (adimensional) (Tabela A.1.2).

– Para o cálculo do Eso e t_1 :

$$Eso = 1,15 \cdot ETo$$

$$t_1 = \frac{AFE}{Eso}$$

– Para o cálculo AET :

$$AET = 1000 \cdot (\theta_{CC} - 0,50 \cdot \theta_{PMP}) \cdot z_e \quad \text{para } ETo \geq 5 \text{ mm dia}^{-1}$$

$$AET = 1000 \cdot (\theta_{CC} - 0,50 \cdot \theta_{PMP}) \cdot z_e \sqrt{\frac{ETo}{5}} \quad \text{para } ETo < 5 \text{ mm dia}^{-1}$$

Sendo: θ_{CC} – umidade volumétrica correspondente à capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{PMP} – umidade volumétrica correspondente ao ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Apêndice 1, Tabela A.1.9); z_e – profundidade superficial do solo que está sendo seca pela evaporação (m) - recomenda-se considerar igual a 0,10 m quando não determinada.

(c) Processo de ajustamento do kc_{med} e kc_{fin}

A equação para o ajustamento do kc_{med} e kc_{fin} consistiu em:

$$kc_{med} = kc_{med(Allen)} + [0,04 \cdot (u_2 - 2) - 0,004 \cdot (UR_{min} - 45)] \cdot \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (7)$$

$$kc_{fin} = kc_{fin(Allen)} + [0,04 \cdot (u_2 - 2) - 0,004 \cdot (UR_{min} - 45)] \cdot \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (8)$$

Condições para utilizar as equações:

$$1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ m s}^{-1}$$

$$20\% \leq HR_{min} \leq 80\%$$

$$0,1 \text{ m} \leq h \leq 10 \text{ m}$$

Sendo: kc_{med} e kc_{fin} – coeficiente de cultivo médio ou final (adimensional); $kc_{med(Allen)}$ ou $kc_{fin(Allen)}$ – coeficiente de cultivo médio ou final recomendado por Allen et al. (1998) (adimensional) (Tabela A.1.2); u_2 – velocidade média do vento a 2 m de altura no respectivo período (médio ou final) (m s^{-1}); UR_{min} – umidade relativa mínima média diária ao longo do respectivo período (médio ou final) (%); h – altura média da planta (m) (Tabela A.1.2).

1.2.3 Análise da resposta das funções estabelecidas e ajustadas

A avaliação de cada função foi realizada em cenários hipotéticos para as culturas do amendoim, cana-de-açúcar, feijão, milho, soja e *Pinus taeda*, para que permitisse a verificação de toda a faixa de variação a que as funções pudessem estar submetidas.

A comparação entre as diferentes funções de kc , nos diferentes cenários, foi realizada empregando análise gráfica, medidas de tendência e dispersão, regressão linear, coeficiente de determinação (R^2), índice “ d ” de Willmott et al. (1985), índice “ c ” de Camargo & Sentelhas (1997), erro médio (EM) e erro absoluto médio (EAM) (Apêndice 2). Os valores de $kc(DAP)_m$ foram adotados como referência para a comparação, com exceção do *Pinus taeda*, em que foram utilizados os valores de kc_m por não haver uma função que representasse diariamente os valores de kc da cultura ao longo do período estudado.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Funções $kc(DAP)$ obtidas para as culturas analisadas

As análises dos kc 's considerando períodos ou ajuste de funções para as culturas analisadas podem ser visualizadas nas Figuras 1.2 e 1.3. Em todas as funções propostas verificou-se a possibilidade de estimar valores diários de kc ao longo dos estádios de desenvolvimento das culturas agrícolas.

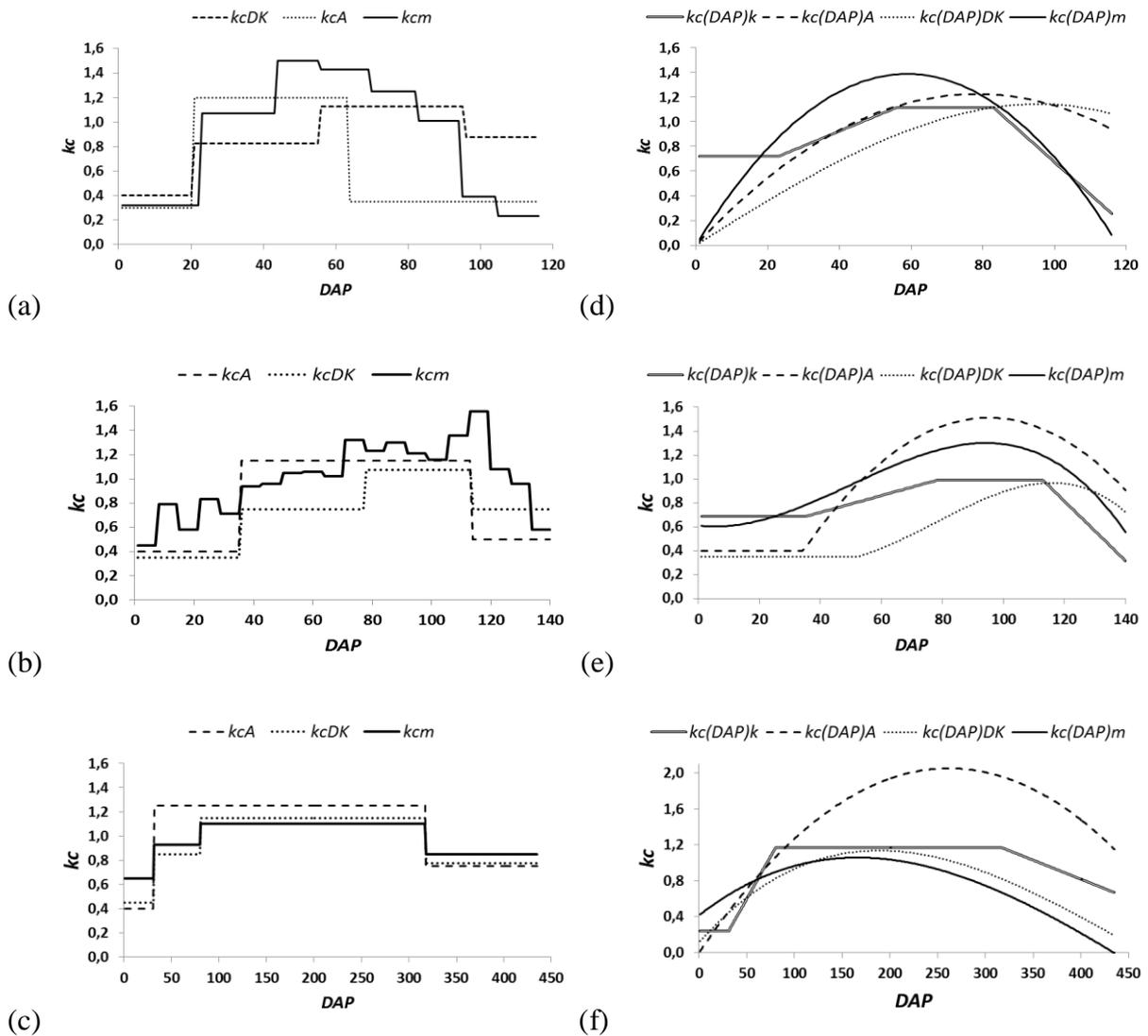


Figura 1.2 – Variação do coeficiente de cultivo (kc) ao longo dos dias após o plantio (DAP), sendo: (a), (b) e (c) valores de kc_A , kc_{DK} e kc_m para as culturas do milho (Detomini et al., 2010), soja (Mendes, 2006) e cana-de-açúcar (Silva et al., 2012), respectivamente, e; (d), (e) e (f) valores de $kc(DAP)_A$, $kc(DAP)_{DK}$, $kc(DAP)_m$ e $kc(DAP)_k$ para as culturas do milho, soja e cana-de-açúcar, respectivamente.

Com exceção da cana-de-açúcar, os valores de kc_{DK} e kc_A apresentaram tendência bem diferente dos valores de kc_m para as culturas analisadas, devido principalmente ao fato de que se aumentou o número de períodos medidos (Figuras 1.2a, 1.2b, 1.2c, 1.3a, 1.3b e 1.3c). Os resultados obtidos são interessantes, pois os valores de kc_{DK} e kc_A são recomendados e utilizados generalizadamente em inúmeros trabalhos encontrados na literatura. A falta de maior concordância entre os valores periódicos de kc indicou que aspectos climáticos e culturais alteram e influenciam decisivamente os valores de kc alcançados ao longo do ciclo produtivo (Zhang et al., 2011; Arif et al., 2012; Zapata et al., 2012).

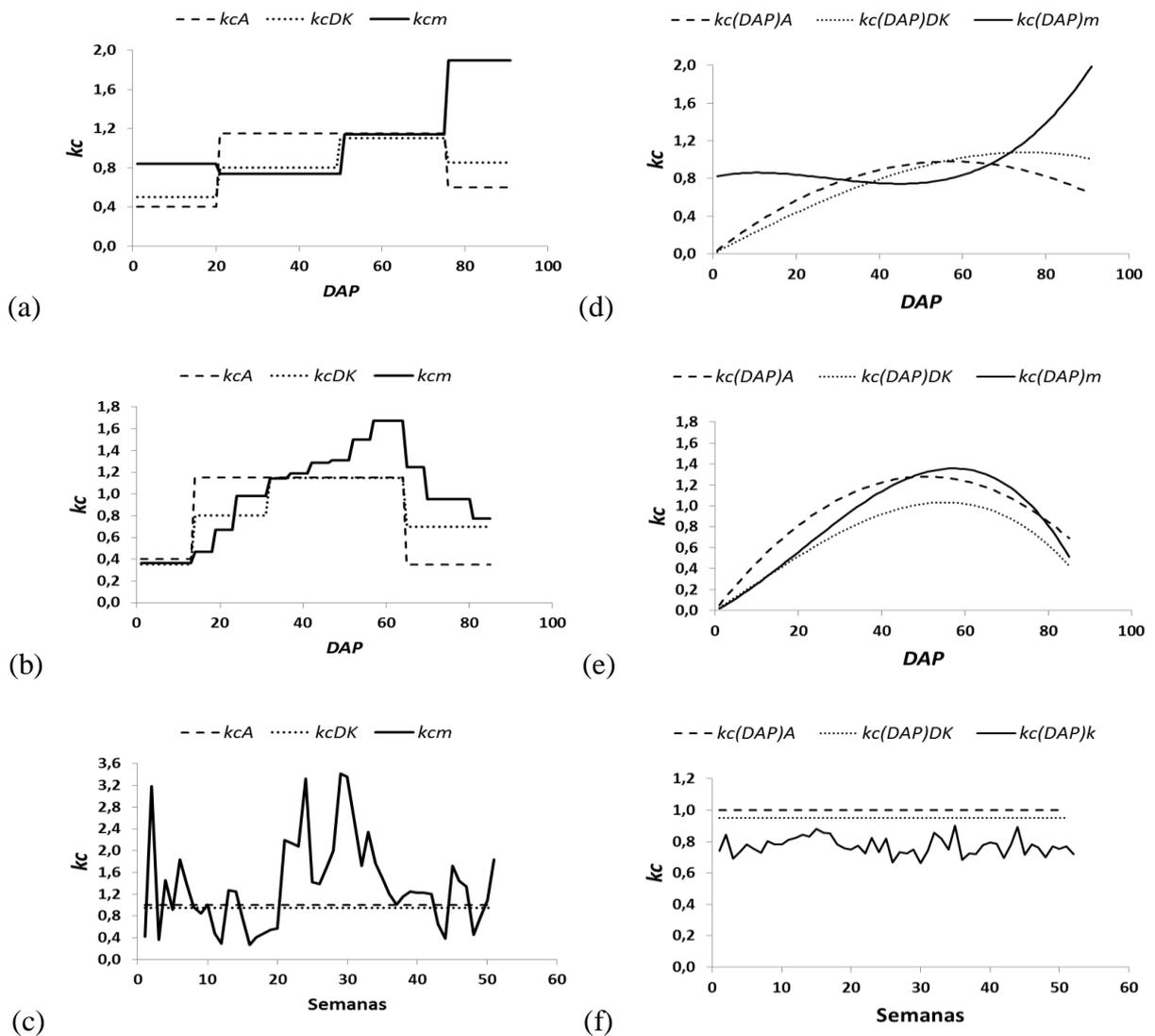


Figura 1.3 – Variação do coeficiente de cultivo (kc) ao longo dos dias após o plantio (DAP), sendo: (a), (b) e (c) valores de kc_A , kc_{DK} e kc_m para as culturas do amendoim (Silva & Rao, 2006), feijão (Medeiros et al., 2000) e *Pinus taeda* (Pachechenik, 2010), respectivamente; e, (d), (e) e (f) valores de $kc(DAP)_A$, $kc(DAP)_{DK}$, $kc(DAP)_m$ e $kc(DAP)_k$ o para as culturas do amendoim, feijão e *Pinus taeda*, respectivamente.

Verificou-se para todas as culturas analisadas, que as funções $kc(DAP)_A$ estimaram valores de kc superiores às funções $kc(DAP)_{DK}$ na maior parte do ciclo das culturas (representado por DAP) (Figuras 1.2d, 1.2e, 1.2f, 1.3d, 1.3e e 1.3f). Essa constatação evidencia, em média, que os valores de evapotranspiração da cultura (ETc) estimados a partir de kc_A ou $kc(DAP)_A$ irão superestimar valores de ETc estimados com kc_{DK} ou $kc(DAP)_{DK}$. Portanto, somente na alternativa de escolha de dados de um autor ou outro já é possível cometer erros na estimativa da ETc .

As regressões kc versus DAP realizadas com valores de kc da literatura, que originaram as funções $kc(DAP)_{DK}$, $kc(DAP)_A$, $kc(DAP)_k$ e $kc(DAP)_m$, indicaram que a função polinomial de 3º grau ajustou-se estreitamente aos dados de DAP para as culturas estudadas, exceto para o *Pinus taeda* (Tabela 1.2). Por ser uma cultura de ciclo longo, o pinus não apresenta modificações morfológicas representativas que alterem o comportamento de seu kc ao longo de períodos curtos (Figura 1.3f). O mesmo tipo de modelo matemático (polinomial de 3º grau) foi encontrado por Leal & Sedyama (2004) para as culturas da banana, cenoura, feijão e melão, e Lopes et al. (2011), para o alecrim-pimenta obtidos em lisímetro de drenagem.

Tabela 1.2. Equações de melhor ajuste, tipo $kc(DAP)$, obtidas para diferentes culturas e locais.

Cultura/Local	Função	R ²
Amendoim (Rodelas-BA)	$kc(DAP)_m = 6 \cdot 10^{-6} \cdot DAP^3 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot DAP^2 + 0,0087 \cdot DAP + 0,8179$	1,0000
	$kc(DAP)_{DK} = -1 \cdot 10^{-6} \cdot DAP^3 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot DAP^2 + 0,0230 \cdot DAP$	0,8645
	$kc(DAP)_A = -3 \cdot 10^{-4} \cdot DAP^2 + 0,0343 \cdot DAP$	0,7126
Cana-de- açúcar (Juazeiro-BA)	$kc(DAP)_m = -2 \cdot 10^{-8} \cdot DAP^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot DAP^2 + 0,0083 \cdot DAP + 0,4163$	1,0000
	$kc(DAP)_{DK} = -2 \cdot 10^{-6} \cdot DAP^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot DAP^2 + 0,0334 \cdot DAP + 0,1146$	1,0000
	$kc(DAP)_A = -3 \cdot 10^{-5} \cdot DAP^2 + 0,0157 \cdot DAP$	0,9808
Feijão (Campinas- SP)	$kc(DAP)_m = -8 \cdot 10^{-6} \cdot DAP^3 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot DAP^2 + 0,0214 \cdot DAP$	0,9480
	$kc(DAP)_{DK} = -4 \cdot 10^{-6} \cdot DAP^3 - 1 \cdot 10^{-4} \cdot DAP^2 + 0,0254 \cdot DAP$	0,9999
	$kc(DAP)_A = -5 \cdot 10^{-4} \cdot DAP^2 + 0,0506 \cdot DAP$	0,8874
Milho (Piracicaba- SP)	$kc(DAP)_m = -2 \cdot 10^{-6} \cdot DAP^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot DAP^2 + 0,0334 \cdot DAP$	0,8584
	$kc(DAP)_{DK} = -6 \cdot 10^{-7} \cdot DAP^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot DAP^2 + 0,0184 \cdot DAP$	0,9833
	$kc(DAP)_A = -2 \cdot 10^{-4} \cdot DAP^2 + 0,0313 \cdot DAP$	0,8881
Soja (Brasília-DF)	$kc(DAP)_m = -6 \cdot 10^{-8} \cdot DAP^3 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot DAP^2 + 0,0286 \cdot DAP$	0,5989
	$kc(DAP)_{DK} = -1 \cdot 10^{-6} \cdot DAP^3 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot DAP^2 + 0,0037 \cdot DAP$	0,9478
	$kc(DAP)_A = -1 \cdot 10^{-4} \cdot DAP^2 + 0,0217 \cdot DAP$	0,6049

A função polinomial de 4º grau não foi analisada no presente estudo porque não corresponde adequadamente à tendência real do kc ao longo dos estádios de desenvolvimento das culturas, como demonstrado por Doorenbos & Kassam (1979) e Allen et al. (1998), devido aos múltiplos pontos de inflexão, e por não representar o comportamento fisiológico das culturas estudadas.

A adoção de um kc para cada estádio de desenvolvimento da cultura do milho, segundo a escala de Fancelli (1986) (10 estádios; kc_m), proposta por Detomini et al. (2009), melhorou a estimativa do kc para períodos, ao longo do ciclo da cultura, em comparação com o kc_{DK} (4 estádios) e kc_A (3 estádios) (Figura 1.2a). As funções $kc(DAP)_{DK}$ e $kc(DAP)_A$, propostas para o milho, apresentaram ponto de máximo para maiores DAP em relação à $kc(DAP)_m$ (Figura 1.2d), indicando que condições edafoclimáticas diferentes podem realmente ocasionar grandes diferenças entre kc_m e kc 's recomendados (kc_{DK} e kc_A). O clima Cwah de Piracicaba-SP, caracterizado por temperaturas médias altas, diminuiu a quantidade de DAP necessários para completar o ciclo da cultura, e o máximo desenvolvimento vegetativo ocorreu por volta de 70 dias (Fancelli, 1986). O resultado evidencia a importância do estabelecimento de kc 's locais que reflitam as condições edafoclimáticas da região em questão, demonstrado na $kc(DAP)_k$, que utiliza dados climáticos locais, apresentando tendência mais próxima da $kc(DAP)_m$.

Os valores de kc_m da soja foram superiores aos valores de kc_{DK} e kc_A , indicando novamente que o clima mais quente de Brasília-DF (Cwa) proporciona distorções em relação aos valores propostos. O resultado obtido concorda com Farias et al. (2001), que também encontraram valores superiores de kc em relação aos recomendados (kc_{DK} e kc_A) para várias regiões brasileiras. Os valores máximos de kc tiveram grande variação entre as funções (Figura 1.2e). A $kc(DAP)_k$ foi a função que melhor acompanhou a tendência da $kc(DAP)_m$, porque melhor refletiu as condições climáticas locais.

As funções $kc(DAP)_{DK}$ e $kc(DAP)_k$ tiveram tendência muito semelhante à $kc(DAP)_m$ para a cana-de-açúcar. A função $kc(DAP)_A$ apresentou valores de kc muito altos para a cultura (por volta de 2,0) (Tabelas A.1.1 e A.1.2), até mesmo para o tipo climático de BSwh.

O polinômio do 3º grau não se ajustou bem aos valores de kc do amendoim, como proposto por Allen et al. (1998). O resultado obtido prejudicou a comparação entre as funções $kc(DAP)$ obtidas. Condições climáticas adversas ocorreram no período experimental, fazendo com que o kc_m na fase de maturação fosse alto (Tabela A.1.6). Provavelmente, precipitação e temperatura muito acima da média ocasionaram alta ETc e aumento acentuado no kc . É

importante observar que valores de kc obtidos em condições climáticas atípicas devem ser evitados para o estabelecimento de funções de $kc(DAP)$ para dada região. A tendência polinomial do 3º grau, como observado na Figura 1.1, foi encontrada por Silva & Amaral (2008) na região do Cariri, Ceará, sendo os valores de kc_m superiores aos kc_{DK} . O estudo destes autores não foi aproveitado no presente trabalho devido à indisponibilidade de dados para realizar as análises.

A função $kc(DAP)_k$ não foi estimada para o amendoim nem para o feijão devido à falta de dados climáticos confiáveis nas regiões. Esse foi um grande obstáculo encontrado para se utilizar as Equações 1 a 8, pois necessitam de dados diários de estações meteorológicas, que muitas vezes não estão presentes nos trabalhos publicados ou nas regiões de interesse. A tendência das funções $kc(DAP)$ para a cultura do feijoeiro foi muito semelhante (Figura 1.3b e 1.3e). Para o *Pinus taeda* (Figura 1.3c e 1.3f) não foi possível a obtenção de um modelo matemático simplificado que explicasse a tendência do kc da cultura. A tendência do kc do pinus difere das culturas anuais, visto que ele é influenciado apenas pelas condições edafoclimáticas do local, já que as condições morfológicas da cultura não se alteraram consideravelmente no tempo.

1.3.2 Avaliação estatística dos valores de kc estimados com as funções

A análise de correspondência e erro cometido na utilização das funções estabelecidas, em relação à função $kc(DAP)_m$, indicou quais funções puderam ser utilizadas para estimar o kc com menor erro possível quando não há kc 's medidos na região de interesse (Tabela 1.3).

De modo geral, houve diferença entre as melhores funções para cada cultura estudada. Para o milho em Piracicaba-SP, os valores mais correspondentes à $kc(DAP)_m$ foram kc_m , porque os parâmetros de ajuste da função vieram da kc_m . Em segundo, a $kc(DAP)_k$, indicando que a utilização de dados climáticos do local favorece estimativas de valores de kc diário, com menor erro absoluto (0,1978), em comparação com valores obtidos em lisímetro de pesagem.

Para a soja, as funções que se destacaram foram a $kc(DAP)_A$ e $kc(DAP)_k$, ocorrendo maior aderência e menores erros, respectivamente. Se não houver estação meteorológica para fornecer dados no tipo climático Cwa, pode-se utilizar a função $kc(DAP)_A$, com erro absoluto de 0,2091.

Tabela 1.3. Análise de correspondência e erro cometido em relação ao $kc(DAP)_m$ para as culturas analisadas, em diferentes locais e tipos climáticos.

Parâmetro	Coeficientes de cultivo (adimensional)					
	kc_m	kc_{DK}	kc_A	$kc(DAP)_{DK}$	$kc(DAP)_A$	$kc(DAP)_k$
----- Amendoim em Rodelas-BA - Clima BSwh -----						
R ²	0,8052	0,0145	0,1438	0,3359	0,0017	----
“d”	0,9079	0,4009	0,1892	0,6542	0,3308	----
“c”	0,8147	0,0483	0,0717	0,3792	0,0136	----
Desempenho	Muito bom	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo	----
EM	0,1054	-0,1419	-0,0820	-0,1788	-0,2089	----
EAM	0,1379	0,1777	0,2984	0,1672	0,2064	----
----- Cana-de-açúcar em Juazeiro-BA - Clima BSwh -----						
R ²	0,5802	0,5527	0,6090	0,8164	0,0080	0,3215
“d”	0,6392	0,7034	0,6679	0,9405	0,3630	0,6470
“c”	0,4869	0,5229	0,5212	0,8498	0,0325	0,3668
Desempenho	Mau	Sofrível	Sofrível	Muito bom	Péssimo	Péssimo
EM	0,9780	0,2242	0,3134	0,0569	0,7834	0,2436
EAM	0,9784	0,2386	0,3332	0,1276	0,8366	0,3143
----- Feijão em Campinas-SP - Clima Cfa -----						
R ²	0,8953	0,6564	0,1491	0,9883	0,9230	----
“d”	0,9548	0,8671	0,6646	0,9141	0,9595	----
“c”	0,9035	0,7025	0,2566	0,9087	0,9218	----
Desempenho	Ótimo	Bom	Péssimo	Ótimo	Ótimo	----
EM	0,1094	-0,0405	-0,0452	-0,1742	0,0674	----
EAM	0,1384	0,2022	0,3566	0,1776	0,1277	----
----- Milho em Piracicaba-SP - Clima Cwsh -----						
R ²	0,8599	0,3893	0,1250	0,2909	0,3913	0,7824
“d”	0,9519	0,7792	0,6047	0,6921	0,7317	0,8498
“c”	0,8827	0,4862	0,2138	0,3733	0,4577	0,7517
Desempenho	Ótimo	Mau	Péssimo	Péssimo	Mau	Muito bom
EM	-0,0538	-0,0156	-0,1452	-0,2815	-0,0737	-0,0817
EAM	0,1450	0,2677	0,4009	0,3654	0,2678	0,1978
----- Soja em Brasília-DF - Clima Cwa -----						
R ²	0,7837	0,7656	0,5725	0,3755	0,8583	0,7703
“d”	0,9317	0,7750	0,8014	0,5636	0,8892	0,7632
“c”	0,8248	0,6781	0,6064	0,3454	0,8238	0,6699
Desempenho	Muito bom	Bom	Mediano	Péssimo	Muito bom	Bom
EM	0,0320	-0,2419	-0,1383	-0,3725	0,0401	-0,1747
EAM	0,1036	0,2511	0,2213	0,3874	0,2091	0,1956
----- Pinus em Telêmaco Borba-PR - Clima Cfa -----						
R ²	----	0,0000	0,0000	----	----	0,0249
“d”	----	0,3781	0,3808	----	----	0,4139
“c”	----	0,0000	0,0000	----	----	0,0653
Desempenho	----	Péssimo	Péssimo	----	----	Péssimo
EM	----	-1,1681	-1,1789	----	----	-0,6118
EAM	----	1,2505	1,2499	----	----	0,7790

Com exceção da $kc(DAP)_m$, não foi possível obter nenhuma função do tipo $kc(DAP)$ que estimasse bem o kc diário para a cultura do amendoim.

A função $kc(DAP)_{DK}$ para a cana-de-açúcar apresentou desempenho “muito bom” e os menores erros. É interessante observar que os valores estimados com $kc(DAP)_{DK}$ foram

melhores que os valores obtidos de kc_m , que ficaram classificados como “mau”, ao contrário das demais culturas, que ficaram classificados entre “muito bom” e “ótimo”.

O feijoeiro mostrou-se uma cultura boa para realizar estimativas de kc diário. Das análises realizadas kc_m , $kc(DAP)_A$ e $kc(DAP)_{DK}$ obtiveram desempenho “ótimo” em relação à $kc(DAP)_m$.

Para o *Pinus taeda*, como não houve valores diários de kc para comparação, a análise de correspondência e erro cometido foi diferente, sendo realizada com valores semanais (kc_m). A periodicidade dos dados prejudicou a análise, por isso não foi verificado aderência alguma em relação aos valores estabelecidos. Mesmo para $kc(DAP)_k$, que varia em função de dados climáticos e poderia apresentar boa aderência, o índice “ d ” foi “péssimo” com erros muito grandes, mostrando que a função não é indicada para estabelecer o kc do pinus adequadamente no local estudado.

Embora limitado em sua utilização, devido a necessidade de dados climáticos específicos, foi possível observar que a $kc(DAP)_k$ teve bons resultados para as leguminosas.

1.3.3 Considerações gerais referente a utilização do kc e $kc(DAP)$ diário na agricultura

O ajuste de funções do tipo $kc(DAP)$, para obtenção de valores de kc diário, mostrou-se uma alternativa boa, porém, dependente de vários fatores. Teixeira et al. (1999) considera que os valores de kc variam também com a variedade da cultura, manejo cultural, sistema de irrigação, tipo e cobertura do solo e método de estimativa da ET_o adotado. Apesar de modelos mais completos ou complexos fornecerem estimativas mais precisas das variações climáticas, têm-se a inconveniência da menor aplicabilidade espacial, devido à inexistência de dados para muitas regiões (Farias et al. 2001).

Em comparação ao uso dos valores de kc periódicos, acredita-se que as funções $kc(DAP)$ podem melhorar a estimativa diária da ET_c e, respectivamente, das demais componentes diárias do balanço hídrico agrícola. No entanto, análises realizadas evidenciaram a impossibilidade de obtenção de função $kc(DAP)$ genéricas para cada cultura, sendo necessário o ajustamento de funções para cada situação de cultivo. O ideal seria que os trabalhos envolvendo estudos com kc apresentassem os valores de kc periódicos, mas também realizassem o ajustamento das funções $kc(DAP)$ ou de outro tipo, considerando aspectos climáticos, fisiológicos e do cultivo.

A proposição das funções $kc(DAP)$ (Tabela 1.2) tiveram como objetivo justamente melhorar e contornar o problema da falta de dados existentes em algumas regiões brasileiras.

A falta de recursos, como estações meteorológicas e levantamento de dados culturais, não deve servir de justificativa para uma agricultura sem planejamento ou pouco eficiente. Assim, a tentativa de ajustar funções a partir de dados publicados e simplificados podem maximizar a eficiência do uso da água na agricultura e evitar desperdícios, principalmente em regiões onde o recurso é tão escasso.

Quando se aumentou a divisão dos estádios de desenvolvimento para obtenção do kc de uma cultura, a curva obtida foi menos condizente com os valores de kc_{DK} e kc_A . Portanto, a estimativa de um valor diário de kc melhorou o ajustamento das funções $kc(DAP)$, tornando-o mais sensível às mudanças fisiológicas das culturas.

Referente às funções $kc(DAP)_k$, embora tenha-se obtido desempenho “muito bom” e “bom” para as cultura do milho e soja, respectivamente, a utilização das equações propostas por Allen et al. (1998) mostrou-se muito complexa, necessitando de grande quantidade de dados de clima e solo. Além das dificuldades citadas e da obtenção de resultados questionáveis, tem-se que os resultados positivos obtidos não propiciaram uma explicação física do fenômeno da evapotranspiração.

Sendo assim, acredita-se também que o ajuste de funções $kc(DAP)$ para a estimativa da ETc diária é uma solução intermediária. A metodologia envolvendo a utilização de kc para encontrar a ETc é muito utilizada à várias décadas, mas apresenta problemas, principalmente quando os valores de kc utilizados não foram determinados para o período e região estudados. Diante disso, seria interessante a intensificação de estudos visando a obtenção direta da ETc à semelhança do que é realizado para a ET_o , a partir do método de Penman-Monteith, em que a função se vale de explicação física e não empírica para o fenômeno.

1.4 CONCLUSÕES

- As funções do tipo $kc(DAP)$ obtidas melhoram a acurácia da estimativa da evapotranspiração da cultura, por refletirem melhor as condições locais, referentes aos diferentes tipos de cultura, solo e clima, em comparação com os valores de kc comumente utilizados na literatura;
- O uso das funções $kc(DAP)$ é uma alternativa para aumentar a eficiência no uso da água em engenharia de irrigação, por possibilitar melhor quantificação do uso da água pelas plantas no tempo;
- Não foi possível estabelecer funções $kc(DAP)$ genéricas, independente da cultura avaliada.

1.5 LITERATURA CITADA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. 1.ed. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300 p.
- ARIF, C., SETIAWAN, B. I.; SOFIYUDDIN, H. A. MARTIEF, L. M.; MIZOGUCHI, M. & DOI, R. Estimating crop coefficient in intermittent irrigation paddy fields using Excel Solver. *Rice Science*, v.19 (2), p.143-152, 2012.
- CAMARGO, A. P. & SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- DETOMINI, E. R.; MASSIGNAN, L. F. D.; LIBARDI, P. L. & DOURADO NETO, D. Consumo hídrico e coeficiente de cultura para o híbrido DKB 390. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 31, n. 3, p. 445-452, 2009.
- DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. Yield response to water. Roma: FAO. (Irrigation and Drainage Paper, 33). 1979. 193p.
- FANCELLI, A. L. Plantas Alimentícias: guia para estudos e discussão. Piracicaba: CALQ, 1986. 131p.
- 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.9, n.3, p.415-421, 2001.
- GADIOLI, J. G.; DOURADO-NETO, D.; GARCÍA Y GARCÍA, A. & BASANTA, M. V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. *ScientiaAgricola*, v.57, n.3, p.377-383, jul./set. 2000.
- LEAL, B. G. & SEDIYAMA, G. C. Modelo matemático para determinação da curva do coeficiente de cultura, kc. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, MG, v.12, n.2, 124-133, Abr./Jun., 2004.
- LIMA, E. P. & SILVA, E. L. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.3, p.266–273. Campina Grande, PB. 2008.
- LIU, Y. & LUO, Y. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, v. 97, p. 31–40, 2010.
- LOPES, O. D.; KOBAYASHI, M. K.; OLIVEIRA, F. G.; ALVARENGA, I. C. A.; MARTINS, E. R. & CORSATO, C. E. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) e eficiência do uso de água do alecrim-pimenta irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.6, p. 548–553, 2011.
- MENDES, R. S. Determinação da evapotranspiração por métodos diretos e indiretos e dos coeficientes de cultura da soja para o Distrito Federal. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, M.; FUJIWARA, M. & BONI, N. R. Crescimento vegetativo e coeficiente de cultura do feijoeiro relacionados a graus-dia acumulados. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.35, n.9, p.1733-1742, set. 2000.

PACHECHENIK, P. E. Demanda hídrica em plantio de pinus e em uma floresta nativa, na região de Telêmaco Borba. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010. 111p. (Tese Doutorado).

SETIYONO, T. D.; WEISS, A.; SPECHT, J.; BASTIDAS, A. M.; CASSMAN, K. G. & DOBERMANN, A. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*, v. 100 p. 257–271, 2007.

SILVA, M. T. & AMARAL, J. A. B. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo do amendoim irrigado em condições edafoclimáticas na região do Cariri do Estado do Ceará. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, vol. 8, núm. 1, primer semestre, p. 76-84, 2008.

SILVA, T. G F.; MOURA, M. S B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S. & JÚNIOR, W. G. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.16, n.1, p.64–71, 2012.

SILVA, L. C. & RAO, T. V. R. Avaliação de métodos para estimativa de coeficientes da cultura de amendoim. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, v.10, n.1, p.128–131, 2006.

TEIXEIRA, A. H. C.; AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, B. B. DA; SOARES, J. M. Consumo hídrico e coeficiente de cultura da videira na região de Petrolina, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, p. 413-416, 1999.

TOLEDO, N. T.; MULLER, A. G.; BERTO, J. L. & MALLMANN, C. E. S. Ajuste do modelo fototérmico de estimativa do desenvolvimento e do índice de área foliar de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.3, p.288–295, 2010.

ZAPATA, N.; CHALGAF, I.; NERILLI, E.; LATORRE, B.; LÓPEZ, C.; MARTÍNEZ-COB, A.; GIRONA, J. & PLAYÁN, J. Software for on-farm irrigation scheduling of stone fruit orchards under water limitations. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.88, p.52–62, 2012.

ZHANG, K.; HILTON, H. W.; GREENWOOD, D. J. & THOMPSON, A. J. A rigorous approach of determining FAO56 dual crop coefficient using soil sensor measurements and inverse modeling techniques. *Agricultural Water Management*, v. 98, p.1081–1090, 2011.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J. & ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO 2 – FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE EFETIVA DO SISTEMA RADICULAR E FRAÇÃO DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO

RESUMO

Os métodos diretos de análise da profundidade efetiva do sistema radicular (z) são onerosos e trabalhosos. Melhor solução consiste em utilizar modelos para realizar estimativas que se aproximem o máximo possível dos valores reais. A fração de água disponível no solo (p) tem grande utilidade na engenharia da irrigação e permite quantificar a água disponível no solo que pode ser absorvida pelas raízes sem gerar estresse hídrico. Teve-se por objetivo no presente trabalho avaliar e identificar funções de melhor desempenho para estimar diariamente a z e fração p para melhorar a determinação do armazenamento da água no solo das culturas agrícolas. As culturas avaliadas foram cana-de-açúcar, feijão e milho. Os modelos utilizados na estimativa da z basearam-se em dias após plantio (DAP), dias julianos (J) e graus-dia acumulado (GDA). Os modelos propostos para estimativa da fração p foram obtidos por regressão polinomial ou baseados na evapotranspiração da cultura (ET_c). A comparação entre os valores reais e estimados foi realizada empregando análise gráfica, regressão linear, coeficiente de determinação (R^2), índice “ d ” de correspondência, índice “ c ” de desempenho, erro médio e erro absoluto médio. Não se encontrou um modelo de estimativa da z que possa ser utilizado generalizadamente para as todas as culturas e tipos climáticos estudados, porque há responsividade específica das culturas de acordo com o fator utilizado no modelo. Os fatores que mais influenciam a z das culturas estudadas em diferentes tipos climáticos foram identificados, possibilitando o estabelecimento dos melhores modelos para a cana-de-açúcar, feijão e milho.

Palavras-chave: Raiz, crescimento radicular, equações, armazenamento de água.

CHAPTER 2 – FUNCTIONS FOR ESTIMATING EFFECTIVE DEPTH OF ROOT SYSTEM AND FRACTION OF AVAILABLE SOIL WATER

ABSTRACT

Direct methods of analysis of the effective root system depth (z) are costly and laborious. Best solution is to use models to make estimates are as close as possible to the actual values. The fraction of available soil water (p) has great utility in irrigation engineering and allows quantification of available soil water that can be absorbed by the roots without causing water stress. This study aimed to evaluate and to identify models of best performance to estimate daily z and fraction p to improve the determination of soil water storage to crops. The cultures evaluated were sugarcane, bean and corn. The models used to estimate z were based on days after planting (*DAP*), julian days (*J*) and accumulated degree-days (*GDA*). The proposed models for estimate fraction p were obtained by polynomial regression or based on crop evapotranspiration (*ETc*). The comparison between the actual and estimated values was performed using graphical analysis, determination coefficient (R^2), index "*d*" of performance, index "*c*" of agreement, mean error and absolute mean error. It was not possible to obtain generic models for determination of z in the studied cultures. Not found an estimating z model that can be used generally for all cultures and climatic types studied, because no specific responsiveness cultures according to the factor used in model. The factors that most influence z of studied crops in different climate types were identified, allowing establishment the best models for sugarcane, bean and corn.

Key-words: Root, root growth, equations, water storage.

2.1 INTRODUÇÃO

A eficiência do uso da água pelas plantas é muito baixa. No entanto, a produção de alimentos é permanente, sendo necessário encontrar alternativas que maximizem a eficiência do uso da água na agricultura. O desafio atual consiste em produzir mais alimento utilizando menos água (Selborne, 2001).

O comprimento total do sistema radicular não indica a real capacidade de extração de água das culturas. Assim, a distribuição da densidade do comprimento radicular ao longo do perfil do solo desempenha atividade mais importante na utilização da água no solo. Por isso, nas atividades envolvendo a cálculo do armazenamento da água no solo é mais indicado utilizar a profundidade efetiva do sistema radicular (z), que corresponde a mais de 95% do sistema radicular ativo, em termos de profundidade e volume explorado (Reichardt & Timm, 2004; Zhang et al., 2009).

Os métodos diretos de análise radicular podem ser utilizados, no entanto, são métodos onerosos e trabalhosos. Além disso, podem levar a interpretações errôneas a respeito da utilização dos recursos do solo, pois normalmente não distinguem raízes mortas de vivas e dificilmente evitam perdas das raízes mais finas, responsáveis por fração considerável da absorção de água e nutrientes (Russell & Ellis, 1968; Oliveira et al., 2000).

Solução mais rápida, eficaz e de menor custo consiste em realizar estimativas que se aproximem o máximo possível de valores reais. No entanto, os modelos presentes na literatura ainda são muito escassos. A dificuldade para proposição de bons modelos deve-se ao fato de existirem inúmeros fatores que influenciam o crescimento das raízes (Borcioni, 2008). Contudo, há alguns fatores que têm maior influência no crescimento do sistema radicular e, nas questões envolvendo planejamento agrícola, os modelos de estimativa da z não precisam ser complexos, mas devem empregar fatores variáveis ao longo do tempo. O problema está em definir quais são os fatores que mais influenciam a z nos diferentes tipos de culturas agrícolas e tipos climáticos.

Modelos envolvendo a variação temporal da z utilizando a dimensão fractal (forma complexa) ou parâmetros estatísticos têm sido largamente utilizados (Dourado Neto et al., 1995). Além do crescimento linear, a z pode ser assumida com crescimento potencial ou sigmoidal a partir do valor inicial até atingir o valor máximo, permanecendo constante e igual ao máximo até atingir o ponto de maturidade fisiológica (Dourado Neto & Van Lier, 1991).

Outro fenômeno que influencia a absorção de água pelas plantas consiste na dinâmica

de que à medida que a umidade do solo diminui, a água fica retida mais fortemente na matriz do solo, sendo mais difícil sua extração. Quando a umidade do solo está abaixo de certo limite, a água do solo não poderá ser absorvida pelas raízes com velocidade suficiente para satisfazer a demanda evapotranspirativa, e a planta começa a passar por estresse hídrico. A fração de água disponível no solo (p) consiste em uma fração do total de água disponível no solo que pode ser absorvida pelas raízes sem gerar estresse hídrico. A taxa de extração de água é influenciada pelo potencial matricial do solo juntamente com a condutividade hidráulica. Portanto, o valor de fração p depende do tipo de solo e umidade, mas a evapotranspiração da cultura é o principal fator que a influencia (Allen et al., 1998).

Doorenbos & Kassam (1979) e Allen et al. (1998) estabeleceram valores constantes de fração p para diversos grupos de culturas agrícolas. Desde então, esses valores vêm sendo utilizados generalizadamente em projetos de irrigação e na estimativa de balanços hídricos.

As avaliações da z e fração p de uma cultura são fundamentais para o cálculo do balanço hídrico agrícola, porque representam o volume de controle da água no sistema solo e a eficiência na absorção de água pela planta, respectivamente. Consequentemente, influenciam diretamente no desenvolvimento de práticas racionais de manejo e uso da água em sistemas agrícolas que visam a otimização da produtividade.

Nesse contexto, teve-se como objetivo no presente trabalho avaliar e identificar funções de melhor desempenho para estimar diariamente a z e fração p para melhorar a determinação do armazenamento da água no solo para as culturas agrícolas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Culturas, locais e tipos climáticos

As culturas avaliadas foram escolhidas para abranger diferentes ciclos, sendo: cana-de-açúcar, feijão e milho. Os valores medidos de profundidade do sistema radicular (z_m) foram obtidos na literatura, em trabalhos científicos que estudaram o desenvolvimento do sistema radicular de uma das culturas avaliadas (Tabela 2.1). Como o tipo de solo tem influência direta no crescimento radicular, ressalta-se que todos os trabalhos foram realizados em Latossolo para permitir a comparação dos dados. Maiores informações sobre os dados experimentais obtidos encontram-se dispostos na Tabela 2.2, no item Resultados e Discussões.

Tabela 2.1. Autores e caracterização da área experimental de procedência dos valores medidos de profundidade do sistema radicular (z_m)

Autoria	Cultura	Solo	Plantio	Local	--- Coordenadas geográficas ---			Tipo climático ⁽¹⁾	Medida de z_m	Periodicidade do z_m (dias)
					S	W	Altitude (m)			
Ido (2003)	Cana-de-açúcar	Latossolo	06/04/1999	Paranavaí-PR	22°55'	52°27'	470	Cfa	Rizotron	Estádios
Parizi (2010)	Feijão	Latossolo	01/12/2008	Santa Maria-RS	29°09'''	54°51''	113	Cfb	Amostragem	Estádios
Parizi (2010)	Milho	Latossolo	01/12/2008	Santa Maria-RS	29°09''	54°51''	113	Cfb	Amostragem	Estádios
Hermes et al. (2003)	Milho	Latossolo	20/10/1997	Piracicaba-SP	22°42'	47°38'	546	Cwa	Amostragem	Estádios

⁽¹⁾ Obtido com a classificação de Köppen.

2.2.2 Modelos de estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular (z)

Os modelos utilizados no presente trabalho baseiam-se no tempo (DAP – dia após o plantio e J – dias julianos) ou nos graus-dia acumulado (GDA). O tempo representa os dias das culturas no campo e os GDA representam o acúmulo de energia nas plantas, ocasionado por uma faixa de temperatura ótima:

(a) Modelo polinomial proposto por Borcioni (2008): consiste em uma função obtida por regressão polinomial que descreve a z baseando-se nos DAP da cultura:

$$z(DAP)_B = 17,5 - 1,68 \cdot DAP + 0,29 \cdot DAP^2 - 0,006 \cdot DAP^3 \quad (2.1)$$

Sendo: $z(DAP)_B$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos dias após plantio (m); DAP – dias após plantio (dias).

(b) Modelo exponencial proposto por Borcioni (2008): consiste em uma função obtida por regressão exponencial entre valores da z e GDA :

$$z(GDA)_B = \frac{51,5}{\left(1 + e^{\left(\frac{-(GDA - 186,9)}{53,4}\right)}\right)} \quad (2.2)$$

Sendo: $z(GDA)_B$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos graus-dia acumulado (m); GDA – graus-dia acumulado (°C).

(c) Modelo sigmoidal proposto por Dourado Neto & Van Lier (1991):

$$z(GDA)_{DV} = z_o + \left(\frac{z_{m\acute{a}x} - z_o}{2}\right) \cdot \left[1 - \cos\left(\pi^{\frac{1}{f}} \frac{GDA_i}{0,7 \cdot GDA_t}\right)^f\right] \quad \text{para } GDA_i < 0,7 GDA_t \quad (2.3)$$

$$z(GDA)_{DV} = z_{m\acute{a}x} \quad \text{para } GDA_i \geq 0,7 GDA_t$$

Sendo: $z(GDA)_{DV}$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos graus-dia acumulado (m); z_o – profundidade inicial do sistema radicular (m); $z_{m\acute{a}x}$ – profundidade máxima do sistema radicular (m); f – fator de forma determinado por meio de análise de regressão (adimensional); GDA_i – graus-dia acumulado até o i -ésimo dia (°C); GDA_t – graus-dia acumulado total necessários para completar o ciclo da cultura (°C).

(d) Modelo proposto por Campbell & Diaz (1988): baseia-se no tempo juliano, que é a contagem seguida dos dias a partir de primeiro de janeiro.

$$z(J)_{CD} = z_{mín} + (z_{máx} - z_{mín}) \cdot \left(\frac{1}{1 + 44,2 \cdot e^{(-8,5 \cdot (J_i - J_o) + (J_f - J_o))}} \right) \quad (2.4)$$

Sendo: $z(J)_{CD}$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função do dia juliano (m); $z_{mín}$ – profundidade efetiva inicial do sistema radicular proposta por Allen et al. (1998) (m); $z_{máx}$ – profundidade efetiva máxima do sistema radicular proposta por Allen et al. (1998) (m); J_i – i -ésimo dia juliano (dia); J_o – dia juliano de emergência da cultura (dia); J_f – dia juliano de maturação da cultura (dia).

Os valores de $z_{mín}$ e $z_{máx}$ da cana-de-açúcar, feijão e milho propostos por Allen et al., (1998) encontram-se na Tabela A.3.1 do Apêndice 3.

(e) Modelos propostos por Allen et al. (1998): são dois modelos condicionais que estabelecem funções para o crescimento inicial da z até chegar ao valor máximo, que é mantido até o final do ciclo da cultura:

– Modelo linear baseado nos dias julianos:

$$z(J)_A = z_{mín} + (z_{máx} - z_{mín}) \cdot \left(\frac{J_i - J_{ini}}{J_{máx} - J_{ini}} \right) \quad \text{para } J_{ini} \leq J_i \leq J_{máx} \quad (2.5)$$

$$z(J)_A = z_{mín} \quad \text{para } J_i < J_{ini}$$

$$z(J)_A = z_{máx} \quad \text{para } J_i > J_{máx}$$

Sendo: $z(J)_A$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função do dia juliano (m); J_i – i -ésimo dia juliano em que a cultura se encontra (dia); J_{ini} – dia juliano inicial de estabelecimento da cultura (dia); $J_{máx}$ – dia juliano quando z alcança $z_{máx}$ no ciclo da cultura (dia).

– Modelo linear baseado no coeficiente de cultivo (kc) diário:

$$z(kc)_A = z_{mín} + (z_{máx} - z_{mín}) \cdot \left(\frac{kc_i - kc_{ini}}{kc_{méd} - kc_{ini}} \right) \quad \text{para } J_i < J_{méd} \quad (2.6)$$

$$z(kc)_A = z_{máx} \quad \text{para } J_i \geq J_{méd}$$

Sendo: $z(kc)_A$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função do coeficiente de cultivo (m); $z_{mín}$ – profundidade efetiva inicial do sistema radicular recomendada por Allen et al.

(1998) (m); $z_{máx}$ – profundidade efetiva máxima do sistema radicular recomendada por Allen et al. (1998) (m); kc_i – valor do coeficiente de cultivo no i -ésimo dia (adimensional); kc_{ini} – valor do coeficiente de cultivo no estágio de desenvolvimento inicial (adimensional); $kc_{méd}$ – valor médio do coeficiente de cultivo ao longo do ciclo da cultura (adimensional); J_i – i -ésimo dia juliano em que a cultura se encontra (dia); $J_{méd}$ – dia médio de duração do ciclo da cultura (dia).

(f) Modelo senoidal proposto por Borg & Grimes (1986), baseado-se no DAP :

$$z(DAP)_{BG} = z_{máx} \cdot \left(0,5 + 0,5 \cdot \text{sen} \left(3,03 \cdot \frac{DAP_i}{DAP_t} - 1,47 \right) \right) \quad (2.7)$$

Sendo: $z(DAP)_{BG}$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos dias após plantio (m); $z_{máx}$ – profundidade efetiva máxima do sistema radicular recomendada por Allen et al. (1998) (m); DAP_i – i -ésimo dia após o plantio (dia); DAP_t – total de dias após o plantio para completar o ciclo da cultura (dia).

(g) Modelo proposto por Schouwenaars (1988), baseado no DAP :

$$z(DAP)_S = z_{máx} \cdot \left(\frac{DAP_i}{DAP_t} \right)^{0,5} \quad (2.8)$$

Sendo: $z(DAP)_S$ – profundidade efetiva do sistema radicular em função de dias após plantio (m); $z_{máx}$ – profundidade efetiva máxima do sistema radicular recomendada por Allen et al. (1998) (m); DAP_i – i -ésimo dia após o plantio (dia); DAP_t – total de dias após o plantio para completar o ciclo da cultura (dia).

2.2.3 Funções para estimar o valor da fração de água disponível (p) do solo

Com a função proposta por Allen et al. (1998), variou-se diariamente a fração p ao longo dos estádios de desenvolvimento das culturas do cana-de-açúcar, feijão, milho e *Pinus taeda*.

$$p(ETc)_A = p_A + 0,04 \cdot (5 - ETc_i) \quad (2.9)$$

Sendo: $p(ETc)_A$ – fração de água disponível em função da ETc do i -ésimo dia (adimensional); p_A – fração de água disponível base para a cultura (Allen et al., 1998) (adimensional); ETc_i – evapotranspiração da cultura no i -ésimo dia (mm dia^{-1}).

Os valores de fração p_A utilizados nas culturas estudadas estão apresentados na Tabela A.3.2 do Apêndice 3.

A função proposta por Allen et al. (1998) possui limitações para culturas que apresentam $p > 0,8$, a partir dos valores de fração p recomendados por Doorenbos & Kassan (1979), que se baseiam na ETc diária com maior amplitude e diferentes grupos de culturas. Sendo assim, análises de regressão ETc vs p com os dados de Doorenbos & Kassan (1979) (Tabela A.3.3 do Apêndice 3) foram realizadas, visando obter uma função do tipo $p(ETc)_{DK}$, que ainda não foi estabelecida ou testada na literatura. Para o ajuste considerou-se: uma equação polinomial de 2º grau; e, que a intersecção da linha de tendência inicia-se no valor de fração $p = 1,0$.

$$p(ETc)_{DK} = a_2 \cdot ETc_i^2 - a_1 \cdot ETc_i + a_0 \quad (2.10)$$

Sendo: $p(ETc)_{DK}$ – fração de água disponível em função da ETc do i -ésimo dia (adimensional); ETc_i – evapotranspiração da cultura no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); a_0 , a_1 e a_2 – coeficientes da função, sendo considerado $a_0 = 1$.

2.2.4 Estimativa da evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura

A ETo foi estimada com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (Allen et al., 1998) (Apêndice 4). Foram utilizados dados climáticos referentes aos anos de 2011, 2012 e 2013 da estação meteorológica automática da ESALQ, localizada em Piracicaba-SP (São Paulo, 2013).

A simulação da data de plantio do feijão, milho e *Pinus taeda* foi estipulada em 01/10/2012 e da cana-de-açúcar em 01/10/2011. A ETc foi calculada com a equação:

$$ETc = ETo \cdot kc$$

Sendo: ETc – evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); ETo – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); kc – coeficiente de cultivo (adimensional).

Os valores de kc utilizados para estimar a ETc encontram-se na Tabela A.1.2 do Apêndice 1.

2.2.5 Análise da resposta das funções testadas e ajustadas de z e fração p

A comparação entre os diferentes modelos foi realizada empregando análise gráfica, medidas de tendência e dispersão, regressão linear, coeficiente de determinação (R^2), índice “ d ” de Willmott et al. (1985), índice “ c ” de Camargo & Sentelhas (1997), erro médio e erro absoluto médio (Apêndice 2).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Avaliação dos modelos de estimativa da z

Na Tabela 2.2 e Figura 2.1 encontram-se os valores de z medidos (z_m) na literatura e estimados por diferentes modelos, em função de DAP , J e GDA , para as culturas da cana-de-açúcar, feijão e milho. Todos os valores de z_m foram obtidos em LATOSSOLO, ou seja, considerou-se que não houve impedimentos físicos ao crescimento radicular.

O modelo $z(DAP)_B$ foi insatisfatório para estimar a z em todas as culturas analisadas (Figuras 2.1b, 2.1e, e 2.2b). Verificou-se valores negativos, indicando que o modelo é mais adequado para culturas de ciclo curto. A tendência de crescimento radicular seguindo o polinômio de terceiro grau não explica o comportamento real de crescimento das raízes, como demonstrado por Dourado Neto et al. (1995). A desvantagem do modelo está na pouca abrangência, sendo próprio para determinada cultura, pois somente considera o tempo da cultura no campo (DAP).

As principais diferenças do modelo $z(DAP)_B$ para o $z(GDA)_B$ é que a z apresentou tendência exponencial neste último e tem como variável dependente os GDA (Figuras 2.1a e 2.1d). Com isso, o modelo foi mais abrangente porque cada cultura possui temperatura base específica e cada local tem condições climáticas próprias que permitem acumular os GDA (Gadioli et al., 2000). No entanto, o $z(GDA)_B$ atingiu a z máxima ($z_{máx}$) por volta dos 400 GDA e valores máximos de z ($z_{máx}$) de 0,515 m (Tabela 2.2), mostrando-se adequado para culturas de pequeno crescimento radicular, como as olerícolas. Para a cana-de-açúcar, que possui $z_{máx}$ maior que 1 m (Ido, 2003), o modelo foi impróprio para estimativa da z .

O modelo sigmoidal $z(GDA)_{DV}$ apresentou aderência à z_m do milho em Piracicaba-SP (Figura 2.1a). Resultados semelhantes foram encontrados por Dourado Neto et al. (1995) e Oliveira et al. (2000). No entanto, a aderência foi diferente em Santa Maria-RS, com o modelo apresentando comportamento sigmoidal até 342 GDA (Figura 2.1d). Depois de 342

GDA a z passou a ter tendência não condizente com o crescimento real, sendo que a $z_{máx}$ não ultrapassou 0,3 m (Tabela 2.2). Assim, o modelo $z(GDA)_{DV}$ foi insatisfatório para estimar a z para culturas em clima mais frio, como o Cfb.

Tabela 2.2. Valores de z medidos (z_m) e estimados por diferentes modelos, em função de dias após plantio (*DAP*), dias julianos (*J*) e graus-dia acumulado (*GDA*), propostos para a cultura do milho, feijão e cana-de-açúcar em diferentes locais e tipos climáticos.

<i>DAP</i>	<i>J</i>	<i>GDA</i>	z_m	$z(DAP)_{BG}$	$z(DAP)_S$	$z(DAP)_B$	$z(GDA)_B$	$z(GDA)_{DV}$	$z(J)_{CD}$	$z(kc)_A$	$z(J)_A$
----- Milho em Piracicaba-SP - Tipo climático Cwah -----											
0	293	0	0,0300	0,0017	0,0000	0,1750	0,1355	0,0300	0,1000	0,0301	0,0300
5	298	59,65	0,0400	0,0125	0,1604	0,1560	0,1570	0,0361	0,1000	0,0301	0,0704
10	303	122,48	0,0600	0,0345	0,2299	0,2370	0,2141	0,0534	0,1000	0,0301	0,1107
15	308	181,54	0,0900	0,0642	0,2799	0,3730	0,3097	0,0785	0,1000	0,0301	0,1511
26	319	306,77	0,1800	0,1524	0,3638	0,6440	0,4775	0,1552	0,7000	0,0910	0,2399
36	329	434,32	0,3000	0,2668	0,4329	0,5292	0,5112	0,2566	0,7000	0,2940	0,3206
46	339	556,67	0,4200	0,3855	0,4901	-0,3016	0,5146	0,3644	0,7000	0,4971	0,4013
54	347	663,03	0,5200	0,4840	0,5349	-1,7236	0,5149	0,4575	0,7000	0,6596	0,4659
63	356	799,17	0,6200	0,5883	0,5872	-4,3761	0,5150	0,5641	0,7000	0,7000	0,5386
76	369	952,78	0,6900	0,6582	0,6412	-10,6900	0,5150	0,6531	0,7000	0,7000	0,6435
83	376	1040,42	0,7000	0,6700	0,6700	-15,5485	0,5150	0,6840	0,7000	0,7000	0,7000
----- Milho em Santa Maria-RS - Tipo climático Cfb -----											
17	351	175,6	0,1187	0,0394	0,2038	0,4327	0,2989	0,1275	0,1187	0,1814	0,1187
31	365	347,0	0,3179	0,1048	0,2752	0,6536	0,4964	0,2025	0,1187	0,3695	0,1714
59	393	717,8	0,4419	0,2931	0,3797	-3,0440	0,5150	0,1300	0,5890	0,5576	0,2767
83	417	1040,6	0,5727	0,4587	0,4503	-15,5485	0,5150	0,1500	0,5890	0,5890	0,3670
91	425	1147,4	0,5860	0,5037	0,4715	-22,5532	0,5150	0,1700	0,5890	0,5890	0,3971
142	476	1711,7	0,5890	0,5549	0,5890	-115,5323	0,5150	0,3196	0,5890	0,5890	0,5890
----- Feijão em Santa Maria-RS - Tipo climático Cfb -----											
17	351	175,6	0,0574	0,0236	0,1320	0,4327	0,2989	0,0739	0,0574	0,0969	0,0574
31	365	347,0	0,2333	0,0629	0,1782	0,6536	0,4964	0,1189	0,3536	0,2154	0,0969
59	393	717,8	0,2980	0,1760	0,2459	-3,0440	0,5150	0,1355	0,3536	0,3339	0,1759
83	417	1040,6	0,3253	0,2754	0,2917	-15,5485	0,5150	0,1591	0,3536	0,3536	0,2436
91	425	1147,4	0,3486	0,3024	0,3054	-22,5532	0,5150	0,1772	0,3536	0,3536	0,2662
122	456	1719,5	0,3536	0,3536	0,3536	-67,6619	0,5150	0,1904	0,3536	0,3536	0,3536
----- Cana-de-açúcar em Paranavaí-PR - Tipo climático Cfa -----											
96	0	—	0,0000	0,0051	0,0000	0,1750	—	—	0,0000	0,0000	0,0000
146	50	—	0,5200	0,0948	0,6682	-0,9150	—	—	0,0000	0,8823	0,2232
187	91	—	1,1200	0,2457	0,9014	-22,5532	—	—	2,0000	1,3950	0,4063
221	125	—	2,0000	0,4152	1,0564	-73,8000	—	—	2,0000	1,6403	0,5580
251	155	—	2,0000	0,5907	1,1764	-156,1890	—	—	2,0000	1,7329	0,6920
284	188	—	2,0000	0,8028	1,2956	-299,1661	—	—	2,0000	1,7122	0,8393
314	218	—	2,0000	1,0044	1,3951	-487,2817	—	—	2,0000	1,5920	0,9732
450	354	—	2,0000	1,7982	1,7778	-2304,0676	—	—	2,0000	2,0000	1,5804
544	448	—	2,0000	1,9999	2,0000	-4820,2333	—	—	2,0000	2,0000	2,0000

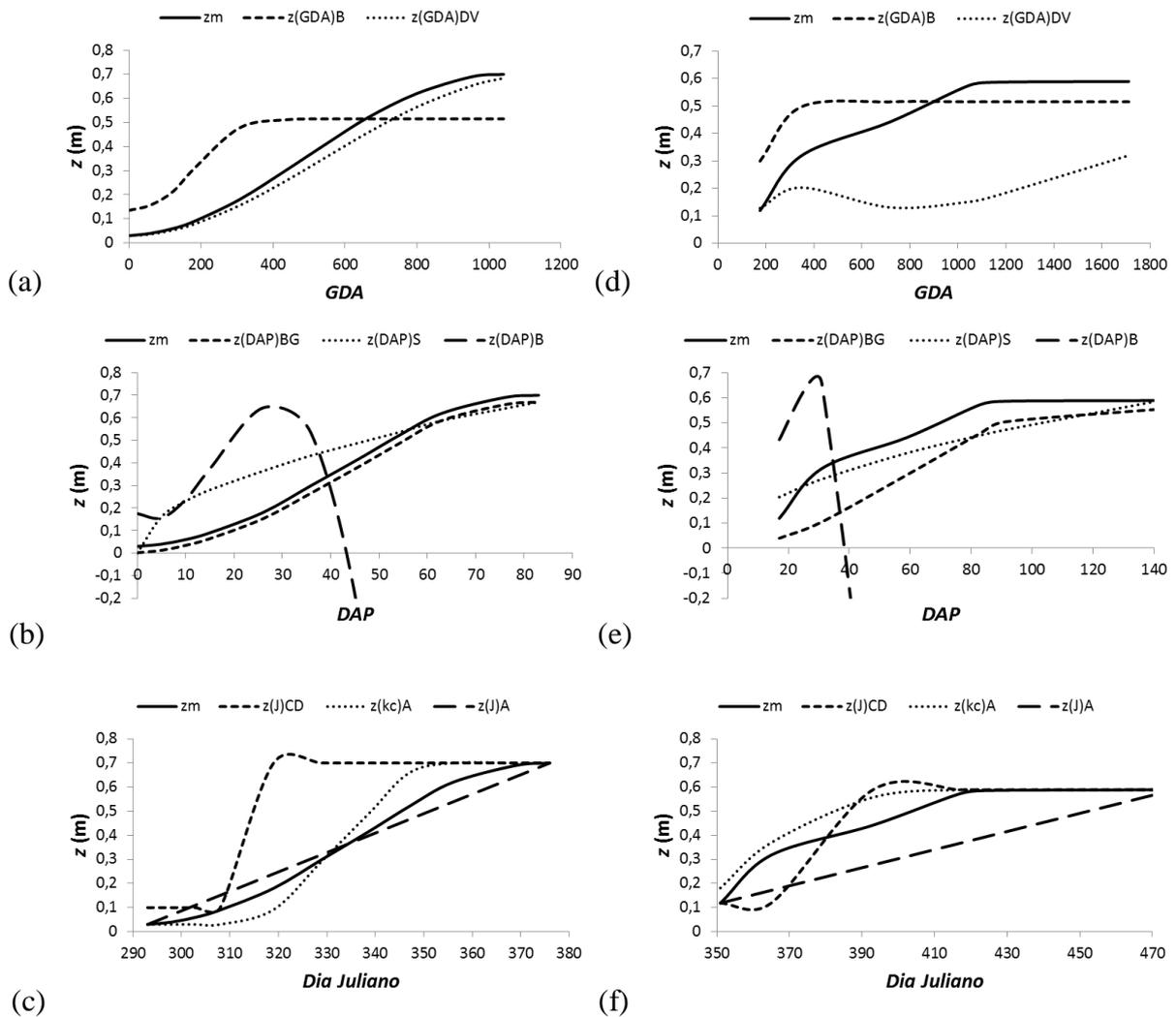


Figura 2.1 – Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura do milho, medidos (z_m) e estimados com os modelos propostos, referentes a graus-dia acumulado (GDA), dias após plantio (DAP) e dias julianos (J), sendo: (a), (b) e (c) dados de z_m referentes à Piracicaba-SP (Hermes et al., 2003) e; (d), (e) e (f) dados de z_m referentes à Santa Maria-RS (Parizi, 2010).

A aderência da $z(J)_{CD}$ diferiu muito em relação à z_m em Piracicaba-SP, tendo melhor desempenho em Santa Maria-RS, tanto na cultura do milho como no feijão (Figuras 2.1c, 2.1f, e 2.2c), demonstrando que o modelo se comportou melhor em climas mais frios. Originalmente Campbell & Diaz (1988) propuseram o modelo para o trigo, que é cultivado em regiões mais frias. Apesar do ciclo e dias julianos serem diferentes do trigo, o modelo $z(J)_{CD}$ teve boa aderência para o crescimento radicular da cana-de-açúcar, no clima Cfa, considerado parecido com Cwa (Figura 2.2e).

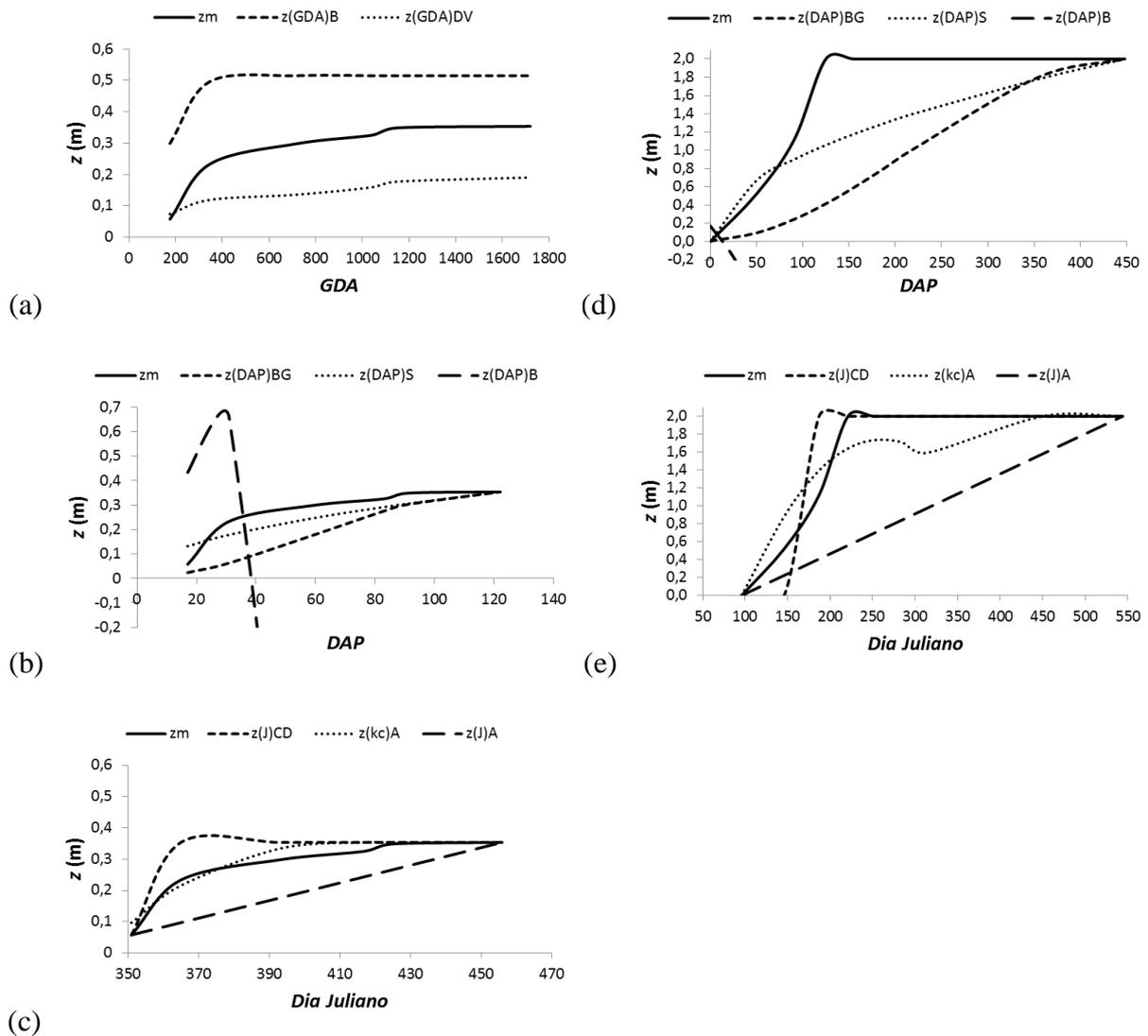


Figura 2.2 – Profundidade efetiva do sistema radicular das culturas do feijoeiro e da cana-de-açúcar, medidos (z_m) e estimados com os modelos propostos, referentes a graus-dia acumulado (GDA), dias após plantio (DAP) e dias julianos (J), sendo: (a), (b) e (c) dados referentes ao feijoeiro em Santa Maria-RS (Parizi, 2010) e; (d) e (e) dados referentes à cana-de-açúcar em Paranavaí-PR (Ido, 2003).

O $z(J)_A$ (Figuras 2.1f, 2.2c, e 2.2e) apresentou o mesmo problema do $z(DAP)_B$ em relação à estimativa de valores diários de z baseando-se no tempo, ou seja, os valores foram os mesmos para as diferentes culturas, tendo tendência linear em todas as culturas avaliadas.

O modelo $z(kc)_A$ teve melhor aderência à z_m ao longo do ciclo das culturas (Figuras 2.1c, 2.1f, 2.2c e 2.2e) porque refletiu melhor suas condições de solo e clima no campo. Como na estimativa do kc diário considera-se variáveis climáticas do local e da própria cultura, verifica-se que o modelo $z(kc)_A$ pode ser utilizado generalizadamente. No entanto, é

importante considerar que a estimativa do kc diário por diferentes funções possui uma série de pontos controversos, como já discutido no Capítulo 1, que podem levar a erros na sua estimativa e o conseqüente erro na estimativa da z por esse modelo.

2.3.2 Análise estatística dos valores estimados de z

Os valores estimados de z com os modelos propostos foram comparados estatisticamente com valores medidos (z_m) para as culturas estudadas em diversos tipos climáticos (Tabela 2.3).

Tabela 2.3. Parâmetros estatísticos obtidos da comparação entre as profundidades efetivas do sistema radicular das culturas analisadas, medidos (z_m) e estimados com os modelos propostos, referentes a graus-dia acumulado (GDA), dias após plantio (DAP) e dias julianos (J), em diferentes locais e tipos climáticos.

Parâmetro	----- Modelos para estimativa da profundidade do sistema radicular -----							
	$z(DAP)_{BG}$	$z(DAP)_S$	$z(DAP)_B$	$z(GDA)_B$	$z(GDA)_{DV}$	$z(J)_{CD}$	$z(kc)_A$	$z(J)_A$
----- Milho em Piracicaba-SP - Tipo climático Cwa -----								
R ²	0,9999	0,8969	0,6250	0,6855	0,9954	0,6664	0,9691	0,9823
“ d ”	0,9965	0,9398	0,0012	0,8299	0,9947	0,8400	0,9867	0,9907
“ c ”	0,9964	0,8901	0,0009	0,6871	0,9924	0,6857	0,9713	0,9819
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Péssimo	Bom	Ótimo	Bom	Ótimo	Ótimo
EM	-0,0277	0,0617	-2,8480	0,0608	-0,0264	0,1375	0,0093	0,0018
EAM	0,0277	0,0853	3,0837	0,1391	0,0264	0,1375	0,0418	0,0353
----- Milho em Santa Maria-RS - Tipo climático Cfb -----								
R ²	0,9234	0,8703	0,2969	0,7461	0,1845	0,8057	0,9515	0,7576
“ d ”	0,8928	0,9234	0,0000	0,7892	0,4873	0,9306	0,9686	0,8317
“ c ”	0,8579	0,8615	0,0000	0,6817	0,2093	0,8353	0,9448	0,7239
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Péssimo	Bom	Péssimo	Muito bom	Ótimo	Bom
EM	-0,1119	-0,0428	-26,3696	0,0382	-0,2544	-0,0055	0,0416	-0,1177
EAM	0,1119	0,0712	26,5862	0,1057	0,2574	0,0609	0,0416	0,1177
----- Feijão em Santa Maria-RS - Tipo climático Cfb -----								
R ²	0,7807	0,8376	0,3385	0,8976	0,9085	0,8484	0,9600	0,7436
“ d ”	0,8485	0,9242	0,0000	0,4797	0,6029	0,9347	0,9833	0,8321
“ c ”	0,7497	0,8458	0,0000	0,4544	0,5747	0,8610	0,9635	0,7176
Desempenho	Bom	Muito bom	Péssimo	Mau	Sofrível	Ótimo	Ótimo	Bom
EM	-0,0704	-0,0182	-18,2229	0,2065	-0,1269	0,0349	0,0151	-0,0704
EAM	0,0704	0,0431	18,4881	0,2065	0,1324	0,0349	0,0211	0,0704
----- Cana-de-açúcar em Paranavaí - Tipo climático Cfa -----								
R ²	0,4535	0,7445	0,1484	----	----	0,8354	0,8917	0,5054
“ d ”	0,6984	0,8546	0,0000	----	----	0,9523	0,9580	0,7112
“ c ”	0,4703	0,7373	0,0000	----	----	0,8704	0,9046	0,5056
Desempenho	Mau	Bom	Péssimo	----	----	Ótimo	Ótimo	Sofrível
EM	-6,6831	-3,3690	-8177,6710	----	----	0,3600	-0,6853	-6,3677
EAM	6,6932	3,6653	8178,0210	----	----	1,4000	1,9598	6,3677

O modelo $z(DAP)_B$ apresentou os maiores erros e os piores índices de desempenho para todas as culturas estudadas, por se tratar de um modelo específico para olerícolas. Muitos valores de z foram negativos, por isso não houve boa aderência em relação à z_m (Tabela 2.3).

Os melhores modelos para estimar a z do milho em Piracicaba-SP foram $z(GDA)_{DV}$, $z(DAP)_{BG}$, $z(J)_A$, $z(kc)_A$, $z(DAP)_S$, $z(J)_{CD}$, respectivamente. Oliveira et al., (2000) também estudando o milho em Piracicaba-SP, com três diferentes variedades, concluiu que o modelo $z(GDA)_{DV}$ teve ótima aderência para expressar a relação funcional entre a soma calórica e a variação do sistema radicular. Portanto, entre os melhores modelos que utilizam DAP , GDA , kc ou J , pode-se utilizar o método mais simplificado para estabelecer a z da cultura no campo. No entanto, Borg & Grimes (1986) comentam que a curva de crescimento radicular é específica para as condições em que é realizado o experimento, a qual depende das interações entre solo, planta, manejo da cultura e clima.

Em Santa Maria-RS, um clima mais frio que Piracicaba-SP, os modelos que mantiveram o desempenho “ótimo” foram $z(kc)_A$, $z(DAP)_{BG}$, $z(DAP)_S$, sendo que os modelos que apresentaram os menores erros foram $z(kc)_A$, $z(J)_{CD}$, $z(DAP)_S$. Portanto, os melhores modelos para o milho em Santa Maria-RS, em geral, foram o $z(kc)_A$ e $z(J)_{BG}$, mostrando novamente a variedade de modelos que podem ser utilizados para estimar a z da cultura do milho. Cabe ressaltar que apesar do $z(DAP)_{BG}$ ter tido desempenho melhor em Santa Maria, seu erro absoluto foi superior ao $z(J)_{CD}$, demonstrando que o índice de concordância “ d ” é mais sensível para analisar o erro cometido que o R^2 ou o índice “ c ”.

Para cultura do feijoeiro os modelos $z(DAP)_B$ e $z(GDA)_B$ apresentaram os maiores erros e os piores índices de correspondência. O único modelo que permaneceu com desempenho “ótimo” foi o $z(kc)_A$, com o $z(J)_{CD}$ passando para “ótimo”. Os dois modelos apresentaram os menores erros. Os modelos que utilizam GDA como variável não tiveram bom desempenho, enquanto os que utilizam DAP foram intermediários. O resultado indicou que a cultura do feijoeiro não é tão responsiva aos GDA como o milho, e que modelos que utilizam o tempo ou kc para determinação da z tiveram melhor aderência.

Não foi possível realizar análises com os modelos $z(GDA)_B$ e $z(GDA)_{DV}$ para a cana-de-açúcar, porque não houve contabilização dos GDA ao longo do desenvolvimento da cultura (Ido, 2003). Os dois únicos modelos que obtiveram desempenho “ótimo” e melhor concordância foram $z(kc)_A$ e $z(J)_{CD}$, respectivamente. Os outros modelos tiveram desempenho entre “bom”, “sofrível” e “mau”.

Segundo Evett et al. (2012), o uso da z constante prejudica o cálculo do balanço hídrico agrícola, pois a capacidade de água disponível (CAD) é assumida constante em todo o volume de controle em qualquer momento. De forma geral, os modelos testados não se mostraram genéricos e aplicáveis a todas as situações e culturas, mas permitiram propor alternativas para obter a CAD em função de z , melhorando as estimativas do armazenamento da água no solo e consequentemente as componentes do balanço hídrico agrícola.

2.3.3 Avaliação das funções de estimativa diária da fração p

Embora estudos envolvendo a determinação da fração p sejam complexos e a estimativa desses valores tenha sido tratada mais superficialmente no presente trabalho, a análise de sensibilidade das duas funções propostas permitiu demonstrar uma série de condições que devem ser observadas quando da sua utilização. Foram propostos valores de ETc que excedem qualquer cultura para verificar quais os limites das funções propostas (Figura 2.3).

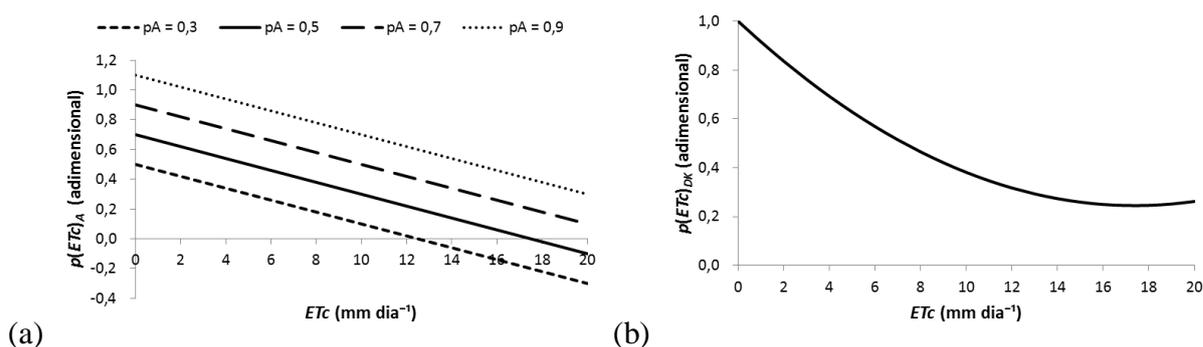


Figura 2.3 – Análise de sensibilidade das funções estabelecidas para estimar o valor da fração p a partir da evapotranspiração da cultura, sendo: (a) $p(ETc)_A$ e; (b) $p(ETc)_{DK}$.

Observou-se para valores de p_A superiores a 0,8 que os valores de $p(ETc)_A$ ultrapassam 1,0 (Figura 2.3a). Por isso, é importante no processo de simulação com a função $p(ETc)_A$ em balanços hídricos, estabelecer que as rotinas considerem a impossibilidade de $p > 1$: evitando a ocorrência de água disponível (AD) maior que a capacidade de água disponível (CAD), pois $AD = CAD \cdot p$; ou, se obtenha armazenamento da água no solo (A_L) negativo, dentro da zona úmida, pois $CAD \cdot (1 - p) \leq A_{L\text{ zona úmida}} \leq CAD$. No entanto, Allen et al. (1998) não recomenda nenhum valor de p_A superior a 0,7 (Tabela A.3.2). Para valores de ETc muito altos, como 12 e 16 mm dia⁻¹, e p_A baixos, como 0,3 e 0,5, os valores da $p(ETc)_A$ também podem ser negativos, o que é incoerente, levando novamente à inconsistência nos cálculos da AD ou A_L .

Segundo Doorenbos & Kassan (1979) e Allen et al. (1998), quando a ETc é igual a zero o valor de fração p é 1,0, pois toda a água está disponível no solo para a planta. Na Figura 2.3b possibilita-se análise dos limites da Equação 2.11, ajustada a um polinômio do 2º grau, a partir dos valores recomendados por Doorenbos & Kassan (1979) (Tabela A.3.3). O coeficiente de determinação obtido na análise de regressão foi $R^2 = 0,987$.

$$p(ETc)_{DK} = 0,0025 \cdot ETc_i^2 - 0,0869 \cdot ETc_i + 1 \quad \text{para } 0 \leq ETc \leq 17 \text{ mm dia}^{-1} \quad (2.11)$$

Sendo: $p(ETc)_{DK}$ – fração de água disponível em função da ETc do i -ésimo dia (adimensional); ETc_i – evapotranspiração da cultura no i -ésimo dia (mm dia^{-1}).

A Figura 2.4 contém os valores de fração p estimados para as culturas da cana-de-açúcar, feijão, milho e *Pinus taeda*, realizadas com os modelos $p(ETc)_A$ e $p(ETc)_{DK}$. Analisando os resultados é possível fazer uma comparação da tendência temporal dos valores estimados com as referidas funções e o valor da p_A recomendado na literatura (Allen et al., 1998). A metodologia recomendada por Allen et al. (1998) é comumente utilizada atualmente na realização de muitos trabalhos envolvendo a estimativa de componentes hídricas (armazenamento de água no solo, variação do armazenamento, deficiência hídrica, evapotranspiração real, excedente hídrico) em balanços hídricos agrícolas.

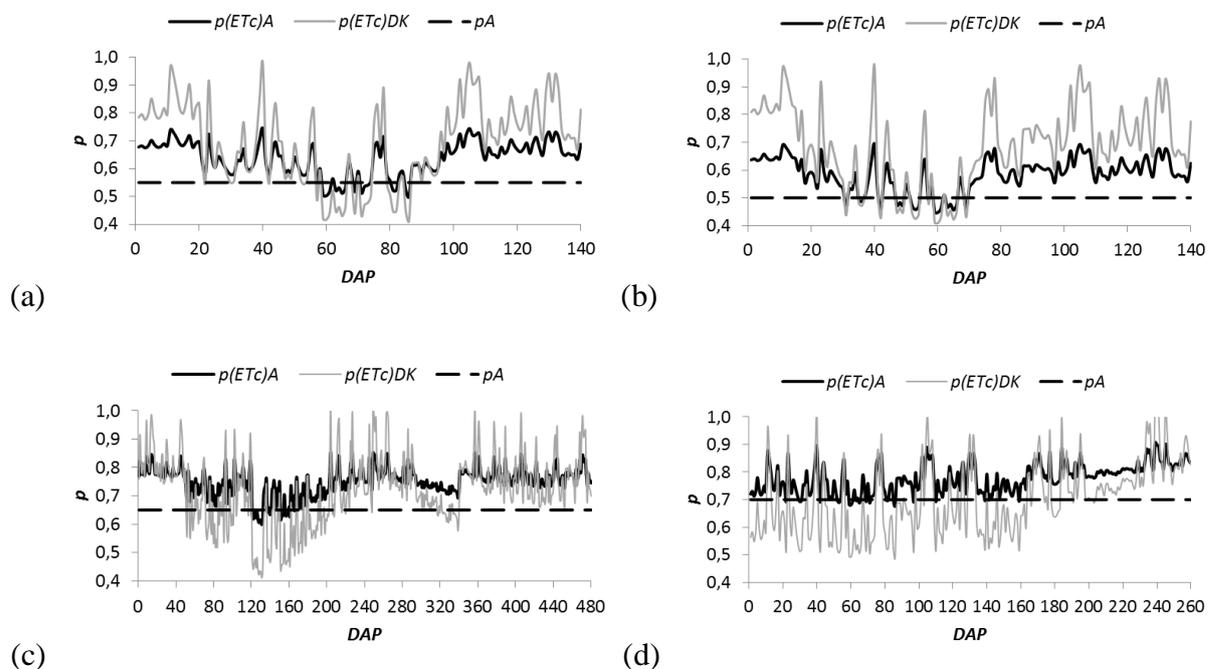


Figura 2.4 – Valores de fração p recomendados na literatura (p_A) e estimados com os modelos $p(ETc)_A$ e $p(ETc)_{DK}$, para diferentes culturas em Piracicaba-SP, nos anos de 2011, 2012 e 2013, sendo: (a) milho; (b) feijão; (c) cana-de-açúcar; e, (d) *Pinus taeda*.

De modo geral, os modelos $p(ETc)_A$ e $p(ETc)_{DK}$ acompanharam inversamente os valores de ETo e principalmente ETc das culturas (Figura 2.5), porque sabe-se que quanto menos a planta transpira, maior a quantidade de água disponível no solo (Allen et al. 1998).

O modelo $p(ETc)_{DK}$ apresentou amplitude maior nas estimativas de valores diários de fração p , em relação ao modelo $p(ETc)_A$, ao longo do desenvolvimento de todas as culturas analisadas. Nesse sentido, o modelo de $p(ETc)_{DK}$ foi mais consistente, porque explica e apresenta melhor tendência do fenômeno da água no solo, enquanto que o $p(ETc)_A$ não. Apesar disso, a utilização do $p(ETc)_A$ é melhor que a simples aplicação do valor p_A , como é realizado atualmente em diversos trabalhos para calcular o armazenamento de água no solo.

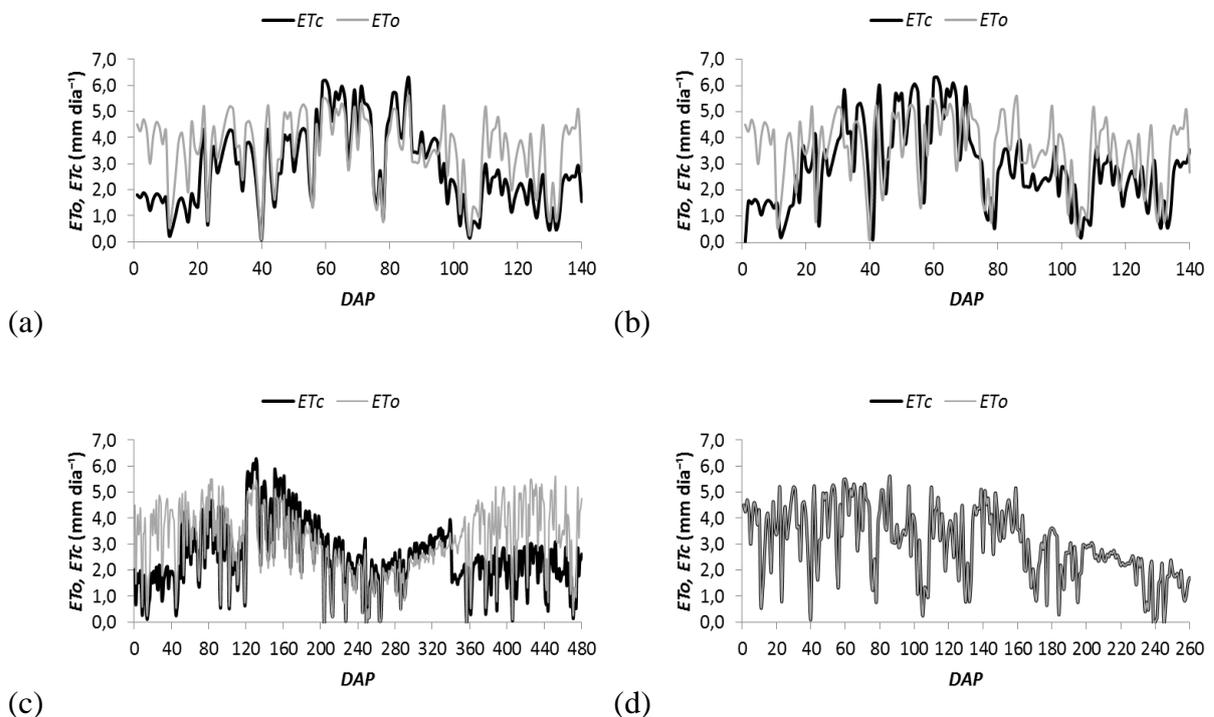


Figura 2.5 – Valores de evapotranspiração da cultura (ETc) e referência (ETo) para diferentes culturas em Piracicaba-SP, nos anos de 2011, 2012 e 2013, sendo: (a) milho; (b) feijão; (c) cana-de-açúcar; e, (d) *Pinus taeda*.

Todo modelo matemático realiza simplificações. Portanto, não há modelo perfeito, mas a utilização de modelos físicos que representem a realidade local de alguma forma já é um grande avanço face à adoção de valores de fração p e z constantes nos estádios de desenvolvimento das culturas agrícolas.

2.4 CONCLUSÕES

- Não se encontrou um modelo de estimativa da z que possa ser utilizado generalizadamente para as todas as culturas e tipos climáticos estudados, porque há responsividade específica das culturas de acordo com o fator utilizado no modelo;
- Os fatores que mais influenciam a z das culturas estudadas em diferentes tipos climáticos foram identificados, possibilitando o estabelecimento dos melhores modelos para a cana-de-açúcar, feijão e milho;
- O modelo $z(DAP)_B$ é insatisfatório para estimar a z nas culturas da cana-de-açúcar, feijão e milho, por ser um modelo empírico específico para culturas de pequena z ;
- Os modelos $z(kc)_A$ e $z(J)_{CD}$ têm boa aderência para as culturas e locais estudados, exceto o modelo $z(J)_{CD}$ para cultura do milho, em Piracicaba-SP;
- O modelo $p(ETc)_{DK}$ é o mais adequado para estimar valores diários de fração de água disponível no solo (p), por conter menos inconsistências em relação ao $p(ETc)_A$.

2.5 LITERATURA CITADA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. 1 ed. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p.
- BORCIONI, E. Equações de estimativa do crescimento do sistema radicular e produção de fitomassa de alface hidropônica. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós- Graduação em Agronomia, RS, 2008.
- BORG, H. & GRIMES, D. W. Depths development of roots with time: an empirical description. Transaction of ASAE, St. Joseph, v. 29, n. 1, p. 194-197, 1986.
- CAMARGO, A. P. & SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CAMPBELL, G.S. & DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F.R. & JOHANSEN, C. Drought research priorities for the dryland tropics. Parancheru, ICRISAT, p.15-26, 1988.
- DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. Yield response to water. Roma: FAO. (Irrigation and Drainage Paper, 33). 1979. 193p.
- DOURADO NETO, D. & VAN LIER, Q. J. Programa para elaboração do Balanço hídrico para culturas anuais e perenes. Piracicaba: ESALQ/USP. Departamento de Agricultura, 1991. 58p.
- DOURADO NETO, D.; PARLANGE, M. B. & NIELSEN, D. R. Mechanistic model to forecast yield for a nonphotosensitive annual crop. Davis: University of California. Department of Land, Air and Water Resources, 1995. 27p.

- EVETT, S. R.; SCHWARTZA, R. C.; CASANOVA, J. J. & HENG, L. K. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. *Agricultural Water Management* v. 104, p. 1–9, 2012.
- GADIOLI, J. G.; DOURADO-NETO, D.; GARCÍA Y GARCÍA, A. & BASANTA, M. V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. *Scientia Agrícola*, v.57, n.3, p.377-383, jul./set. 2000.
- HERMES, C. C.; MEDEIROS, S. L. P. & MANFRON, P. A. Modelo da profundidade efetiva do sistema radicular na cultura de milho em função de graus-dia acumulados. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 327-332, 2003.
- IDO, O. Desenvolvimento radicial e caulinar, de três variedades de cana-de-açúcar, em Rizotron, em dois substratos. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2003.
- OLIVEIRA, O. J.; GARCIA, A. G. & DOURADO NETO, D. Modelo co-senoidal referente à curva de crescimento do sistema radicular da cultura de milho (*Zeamays L.*) sob irrigação em condições de campo. *Ciência agrotecnológica*, Lavras, v. 24 (Edição Especial), p.197-204, dez., 2000.
- PARIZI, A. R. C. Funções de produção das culturas de milho e feijão através de estudo experimental e simulado. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2010.
- REICHARDT, K. & TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manoele, 2004. 478p.
- RUSSELL, R..S. & ELLIS, F..B. Estimation of the distribution of plant roots in soil. *Nature*, v.27, p.582-583, 1968.
- SÃO PAULO. Série de Dados Climatológicos do Campus Luiz de Queiroz de Piracicaba, SP. Departamento de Engenharia de Biosistemas Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo. LEB - ESALQ – USP. 2013.
- SELBORNE, L. A ética do uso da água doce: um levantamento. Brasília: UNESCO, 2001. 80p.
- SCHOUWENAARS, J.M. Rainfall irrigation and sowing strategies in southern Mozambique. *Agriculture Water Management*, Amsterdam, v. 13, n. 1, p. 49-64, 1988.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J. & ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.
- ZHANG, X.; CHEN, S.; SUN, H.; WANG, Y.; SHAO, L. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors. *Field Crops Research*, v.114, p.75–83, 2009.

CAPÍTULO 3 – APERFEIÇOAMENTOS PARA ESTIMATIVA DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA DO *Pinus taeda* L. EM TELÊMACO BORBA-PR

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho ajustar e comparar as componentes de um balanço hídrico agrícola (BHA) estimado com as componentes medidas em um balanço hídrico do solo (BHS), cultivado com *Pinus taeda*, na região de Telêmaco Borba-PR. O experimento foi realizado na fazenda Monte Alegre, ao longo do ano de 2009. Os atributos físicos do solo foram obtidos a partir de duas trincheiras escavadas na área experimental. O BHS foi realizado a partir de amostras e medidas de umidade do solo, considerando os fluxos verticais. O BHA foi calculado a partir de variáveis climáticas, valores de coeficiente de cultivo (kc) e fração (p) de água disponível no solo, estimados diariamente. A comparação entre a variação do armazenamento de água no solo e evapotranspiração real foi realizada empregando análise gráfica, coeficiente de determinação (R^2), índice “ d ” de concordância, índice “ c ” de desempenho, erro médio e erro absoluto médio. Os dados foram analisados e agrupados semanalmente e mensalmente. O emprego de valores de kc e fração p diários melhoram a estimativa do BHA do *Pinus taeda*, tornando-o mais sensível às mudanças morfoclimáticas locais e, conseqüentemente, mais confiável para o planejamento agrícola. O BHA subestima o valor total da evapotranspiração real do *Pinus taeda* e superestima a variação do armazenamento de água no solo acumulada em relação ao BHS. As funções de estimativa diária da fração p não alteram os valores de variação no armazenamento de água no solo e evapotranspiração real, quando o solo se encontra na zona úmida.

Palavras-chave: Coeficiente de cultivo, profundidade efetiva do sistema radicular, fração de água disponível no solo, evapotranspiração da cultura.

CHAPTER 3 – IMPROVEMENTS TO ESTIMATE AGRICULTURAL WATER BALANCE OF *Pinus taeda* L. IN TELÊMACO BORBA, PARANÁ STATE

ABSTRACT

This study aimed to adjust and compare the components of an agricultural water balance (AWB) with measurements in a soil water balance (SWB), planted with *Pinus taeda* in Telêmaco Borba, Paraná State. The experiment was conducted in Monte Alegre farm throughout the year 2009. The physical attributes of soil were obtained from two trenches dug in the experimental area. The SWB was performed from samples and soil moisture measurements, considering the vertical fluxes. The AWB was calculated from climatic variables, crop coefficient (kc) values and fraction of available soil water (p), estimated daily. The comparison between variation in soil water storage and real evapotranspiration was performed using graphical analysis, determination coefficient (R^2), index "d" of concordance, index "c" of performance, mean error and absolute mean error. The grouped data was analyzed weekly and monthly. The use of daily kc and fraction p values improve estimate of AWB of *Pinus taeda*, making it more responsive to local morphoclimatic changes and, therefore, more reliable for agricultural planning. The AWB underestimates total amount of *Pinus taeda* real evapotranspiration and overestimates accumulated variation of soil water storage in relation to SWB. The daily estimate functions of fraction p do not change values of variation of soil water storage and real evapotranspiration when soil is in the wetland.

Key-words: Crop coefficient, effective depth of root system, fraction of soil available water, crop evapotranspiration.

3.1 INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico é definido como o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, constituindo-se em um processo contínuo de transporte de massas de água. O balanço hídrico (BH) consiste na contabilização do ciclo hidrológico, podendo ser realizado para várias escalas. O balanço hídrico no solo (BHS) para uma cultura é definido como a contabilização dos fluxos de entradas e de saídas de água em dado volume de controle, durante determinado intervalo de tempo (Reichardt & Timm, 2004; Libardi, 2005).

A determinação da quantidade hídrica disponível depende basicamente da variação do armazenamento de água do solo, ou seja, da quantidade de água disponível para uma cultura em dado intervalo de tempo, cuja quantificação é feita pelo balanço hídrico. O resultado pode ser utilizado em zoneamentos agroclimáticos, demanda de água das culturas e definição de prioridades no planejamento de pesquisas (Pereira et al., 1997; Bruno et al., 2007).

O conhecimento prévio das componentes do balanço hídrico favorece o planejamento agropecuário e as práticas de controle de produção, disponibilizando informações que permitem identificar as fragilidades climáticas, sendo ferramenta essencial para o sucesso da produção agrícola, inclusive para sistemas de irrigação (Ji, et al., 2007; Santos et al., 2010).

Dentre os vários tipos de BH's destacam-se os modelos pedológicos, em que a condição hídrica do solo é monitorada baseando-se na umidade determinada por diferentes métodos, e os modelos físicos que se baseiam na relação entre umidade e tensão da água no solo. Existem ainda modelos que relacionam propriedades físico-hídricas do solo com componentes de entrada e saída de água do sistema solo, os quais são conhecidos como balanços de água no solo ou simplesmente balanços hídricos (Hillel, 1980).

Os balanços hídricos a partir da umidade do solo ficam restritos a pequenas áreas, e geralmente têm como objetivo verificar modelos matemáticos desenvolvidos para simular e realizar estimativas do balanço hídrico. Desta forma, inúmeros pesquisadores procuraram desenvolver processos indiretos para estimá-lo, a partir de variáveis climáticas (Praveena et al., 2012).

O desenvolvimento e utilização de modelos de simulação do BH têm se intensificado ultimamente, e com o advento da informática, muitas dificuldades operacionais vêm sendo desconsideradas como obstáculos. Apesar das facilidades, o desenvolvimento e validação de

novos modelos ainda é algo complexo, demandando tempo considerável entre sua idealização, calibração e cumprimento da função a que se destina (Pinheiro et al., 2010).

A estimativa do balanço hídrico agrícola (BHA) muitas vezes é necessária devido a uma série de circunstâncias, das quais podemos citar problemas de custo, mão-de-obra, baixa tecnologia na região, tamanho da área a ser monitorada. No entanto, atualmente, algumas variáveis de entrada do BHA não correspondem à realidade das culturas no campo, principalmente em relação às variações temporais. Assim, devido à falta de estudos locais especializados e complexidade da medida, por conveniência, muitos dados de entrada no modelo são estimados com critérios pouco técnicos, sendo na maioria dos casos consideradas constantes ao longo do tempo, ou tendo variação apenas entre os estádios de desenvolvimento das culturas (Adamuchio, 2011).

O problema ocorre em alguns dados de entrada do BHA, como coeficiente de cultivo (kc) e fração de água disponível no solo (p), que influenciam diretamente o resultado das componentes de saída do BHA, como armazenamento de água no solo (A_L), deficiência hídrica (DEF) e evapotranspiração real (ER). Assim, à medida que se realiza uma variação temporal das variáveis de entrada, podendo-se chegar até a uma variação diária ou horária, o BHA torna-se mais sensível a pequenas variações ocorridas ao longo do ciclo das culturas, possibilitando estimativas mais confiáveis para serem utilizadas no planejamento agrícola (Scheraiber, 2012).

Teve-se por objetivo no presente trabalho ajustar e comparar as componentes de um balanço hídrico agrícola estimado com as componentes medidas em um balanço hídrico do solo, cultivado com *Pinus taeda*, na região de Telêmaco Borba-PR.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização da área de estudo

Os dados de campo foram coletados em um experimento preliminar realizado na Fazenda Monte Alegre, pertencente à empresa Klabin Florestal, localizada na região de Telêmaco Borba-PR, nas coordenadas 24°13'19" S, 50°32'33" W e 700 m de altitude (Figura 3.1). Os dados foram coletados no ano de 2009 (Pachechenik, 2010), em uma área de 12,5 ha de *Pinus taeda*, com idade de plantio de seis anos, no espaçamento padrão de 2,0 x 3,0 m (1667 árvores ha⁻¹). O solo do experimento foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO A moderado, textura argilosa e relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2006).

A região está localizada no Segundo Planalto Paranaense e, segundo a classificação de Köppen, apresenta clima transicional tipo Cfa/Cfb, subtropical úmido transicional para temperado propriamente dito, com temperatura média no mês mais frio inferior a 16 °C, verões quentes com temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida, e precipitação média anual de 1490 mm (Caviglione et al., 2000).

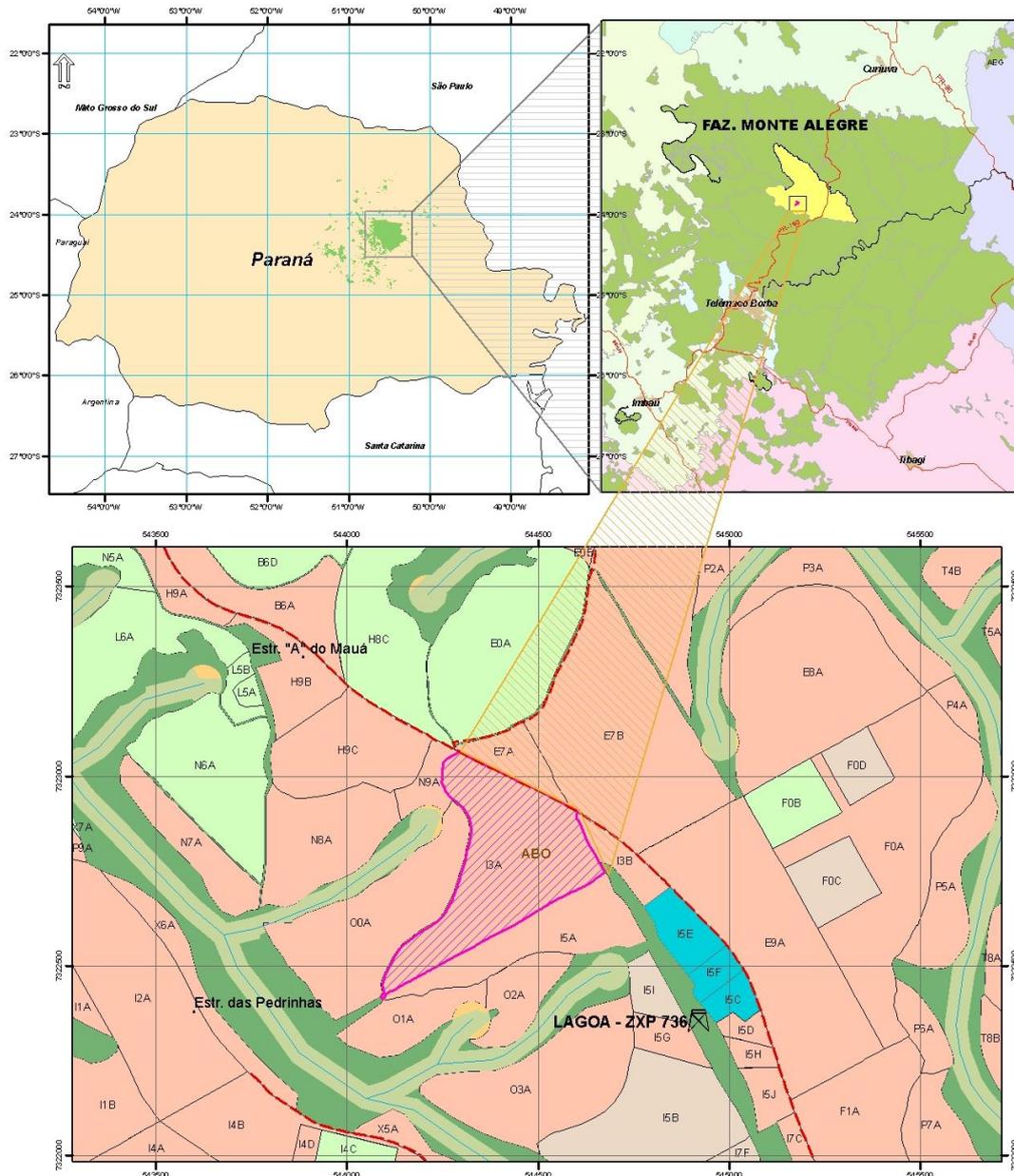


Figura 3.1. Localização da fazenda Monte Alegre, pertencente à empresa Klabin Florestal, na região de Telêmaco Borba-PR, contendo a área de pinus.

3.2.2 Procedimentos para amostragem do solo

As amostras deformadas de solo foram retiradas semanalmente entre os dias 08 de janeiro e 30 de dezembro de 2009 (52 semanas), com auxílio de trado holandês, em dois pontos dentro da área experimental, nas profundidades 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6 e 0,6-1,0 m. A determinação da umidade gravimétrica foi realizada conforme os procedimentos da EMBRAPA (1997), sendo que as amostras coletadas foram homogeneizadas (Pachechenik, 2010).

As amostras indeformadas foram coletadas em outubro de 2009, em duas trincheiras escavadas na área do pinus, contendo 1,5 m de largura, 3 m de comprimento e 1,8 m de profundidade (Figura 3.2). As amostras foram retiradas com auxílio de anéis volumétricos, nas profundidades de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6 e 0,6-1,0 m, com três repetições em cada profundidade. Os atributos físicos do solo com as amostras indeformadas (massa específica, condutividade hidráulica do solo saturado, curva de retenção da água no solo) foram determinados conforme os procedimentos da EMBRAPA (1997) (Apêndice 5) (Pachechenik, 2010; Fezer, 2013).



Figura 3.2 – Trincheira onde foram coletadas as amostras indeformadas de solo, localizada em Telêmaco Borba-PR (Pachechenik, 2010).

3.2.3 Balanço hídrico do solo (BHS)

O BHS foi realizado considerando intervalos semanais, totalizando 52 semanas no ano de 2009. Os cálculos foram realizados fazendo-se apenas a contabilização dos fluxos verticais. Como a área de estudo é relativamente plana, considerou-se que os escoamentos superficiais (E_s e E_s') e subsuperficiais (ES_s e ES_s') de entrada e saída se anularam. Não houve irrigação na área.

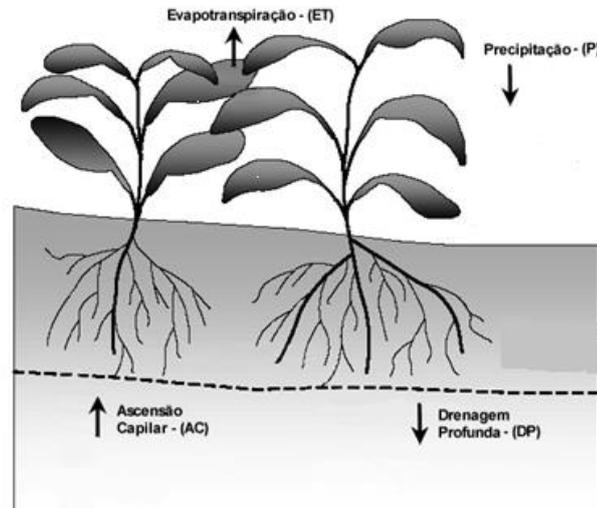


Figura 3.3 – Componentes de entrada e saída do balanço hídrico do solo, considerando apenas os fluxos verticais (Adaptado de Allen et al., 1998).

$$\int_0^{z_n} \int_{t_j}^{t_{j+1}} \frac{\partial \theta}{\partial t} dt dz = \int_{t_j}^{t_{j+1}} P dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} I dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} Es dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} ESS dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} AC dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} D dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} ER dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} Es' dt - \int_{t_j}^{t_{j+1}} ESS' dt$$

$$\int_0^{z_n} \int_{t_j}^{t_{j+1}} \frac{\partial \theta}{\partial t} dt dz = \int_{t_j}^{t_{j+1}} P dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} AC dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} D dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} ER dt$$

Com as simplificações, a evapotranspiração real (ER) foi calculada a partir da seguinte expressão:

$$ER = -\Delta A_L + P - D + AC$$

A umidade volumétrica do solo (θ) foi obtida multiplicando-se respectivamente a umidade gravimétrica (u_i) pela massa específica (ρ_i) de cada i -ésima camada de solo (Apêndice 5).

O armazenamento de água no solo (A_L) foi calculado empregando a regra do trapézio, sendo a variação do armazenamento obtida da diferença entre o armazenamento anterior (A_{Lj}) e atual (A_{Lj+1}):

$$A_{Lj} = \int_0^{z_n} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\theta_i + \theta_{i+1}) \cdot z_{i+1}}{2}$$

$$\int_0^{z_n} \int_{t_j}^{t_{j+1}} \frac{\partial \theta}{\partial t} dt dz = \int_{t_j}^{t_{j+1}} (\theta_{j+1} - \theta_j) dz = \int_0^{z_n} \theta_{j+1} dz - \int_0^{z_n} \theta_j dz = A_{Lj+1} - A_{Lj} = \Delta A_L$$

Sendo: θ – umidade volumétrica do solo na i -ésima profundidade e j -ésimo dia da semana ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); z_i – profundidade efetiva do sistema radicular na i -ésima camada de solo (m); t – tempo

(dias); P – precipitação (mm período⁻¹); I – lâmina de irrigação (mm período⁻¹); Es – escoamento superficial de entrada (mm período⁻¹); ESs – escoamento subsuperficial de entrada (mm período⁻¹); AC – ascensão capilar (mm período⁻¹); D – drenagem interna (mm período⁻¹); ER – evapotranspiração real da cultura (mm período⁻¹); Es e Es' – escoamento superficial de saída e entrada (mm período⁻¹); ESs e ESs' – escoamento subsuperficial de saída e entrada (mm período⁻¹); A_{Lj} – armazenamento de água no solo no j -ésimo dia (mm período⁻¹); ΔA_L – variação do armazenamento de água no solo no período considerado (mm período⁻¹); j – semanas ao longo do ano em que as amostras foram retiradas (52 semanas); i – camadas de coleta das amostras de solo; n – número de camadas de solo, sendo: 1: 0-0,1, 2: 0,1-0,2, 3: 0,2-0,4, 4: 0,4-0,6, 5: 0,6-1,0 m.

Os valores diários de precipitação pluvial (mm dia⁻¹) foram obtidos da estação meteorológica da Lagoa, localizada em Telêmaco Borba-PR, nas coordenadas 24°13'24" S, 50°32'32" W e altitude de 885 m, anexa ao experimento. As precipitações diárias foram corrigidas considerando a interceptação:

$$P_c = P - P \cdot I_i$$

Sendo: P_c – precipitação pluvial diária corrigida (mm dia⁻¹); P – precipitação pluvial diária (mm dia⁻¹); I_i – índice de correção da interceptação (adimensional) – 20%, conforme estudo de interceptação foliar obtido experimentalmente na mesma área, ao longo do ano de 2009.

A componente drenagem interna (D) ou ascensão capilar (AC) foi calculada por meio da densidade de fluxo de água no solo (q_z), utilizando a equação de Darcy-Buckingham:

$$q_z = -K(\theta) \cdot \frac{\partial H}{\partial z}$$

Sendo: q_z – fluxo de água no solo para a profundidade considerada (mm dia⁻¹); $K(\theta)$ – condutividade hidráulica do solo não saturado (mm dia⁻¹); $\partial H / \partial z$ – gradiente de potencial total (m m⁻¹) na última camada.

Como o fluxo ocorre entre camadas de solo e dias diferentes, a equação de Darcy-Buckingham foi adaptada à periodicidade. O gradiente de potencial total $\partial H / \partial z$ foi calculado por diferenças finitas. A densidade de fluxo de uma camada resultou do produto entre valores médios da condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ e gradiente de potencial total $\Delta \bar{H} / \Delta z$ de j -ésimos períodos distintos.

$$\frac{\Delta \bar{H}}{\Delta z} = \left(\frac{H_i - H_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \right)$$

$$H = h + z$$

$$q_z = -\bar{K}(\theta) \frac{\Delta \bar{H}}{\Delta z}$$

$$q_{z_{j+1}} = -\frac{(K(\theta)_j + K(\theta)_{j+1})}{2} \cdot \frac{\left[\left(\frac{H_i - H_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \right)_j + \left(\frac{H_i - H_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \right)_{j+1} \right]}{2}$$

Sendo: $\Delta \bar{H} / \Delta z$ – gradiente de potencial total calculado por diferenças finitas (adimensional); H_i – potencial hidráulico na i -ésima camada de solo (m); z_i – profundidade efetiva do sistema radicular na i -ésima na camada de solo (m); h – potencial matricial ou de pressão (m); q_{z_j} – fluxo de água no solo para a camada e j -ésimo período considerado (mm dia^{-1}).

A estimativa dos valores de condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ foi realizada utilizando os parâmetros de regressão obtidos com o modelo de Van-Genuchten (1980), seguindo-se a restrição de Mualem (1976).

$$K(\theta) = K_0 \cdot \left(\frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \right)^\ell \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2$$

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n \right)^m}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Sendo: $K(\theta)$ – condutividade hidráulica do solo não saturado (mm dia^{-1}); K_0 – condutividade hidráulica do solo saturado (mm dia^{-1}); θ – umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_r – umidade residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s – umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ℓ – parâmetro empírico estimado por Mualem (1976) como sendo aproximadamente igual a 0,5; ψ_m – potencial matricial da água no solo (hPa); α – parâmetro empírico de ajuste da curva de retenção (hPa^{-1}), n e m – parâmetros empíricos de ajuste (adimensionais).

As tensões e conseqüentemente da curva de retenção da água do solo, para cada profundidade, foram determinadas em experimento prévio (Pachechenik, 2010) com amostras previamente saturadas em laboratório e submetidas ao processo de secagem nas tensões de 0,006; 0,01; 0,1 e 1,5 MPa. Foram utilizadas para esse processo a mesa de tensão e câmara de Richards. Considerou-se como capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murchamento permanentes (θ_{PMP}) os valores de umidade obtidos nas tensões de 0,006 MPa e 1,5 MPa, respectivamente. Em relação à θ_{cc} adotou-se como conceito o momento em que cessa a taxa de drenagem. A porosidade total foi considerada igual à umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s). O ajuste da curva de retenção de água no solo (Fezer, 2013) foi realizado com o modelo proposto por Van Genuchten (1980), utilizando o programa *Soil Water Retencion Curve*, desenvolvido por Dourado Neto et al. (2001) (Tabela A.5.2 do Apêndice 5).

3.2.4 Balanço hídrico agrícola (BHA)

A simulação do BHA foi realizada com auxílio do programa computacional desenvolvido em linguagem de programação *Visual Basic Application (VBA - Macros)*, denominado “*MORETTI – Módulo: Balanço hídrico sequencial (periodicidade diária), Versão 1.0*” (Souza, 2008), por ser um programa que permite a estimativa do BHA com diferentes periodicidades e entrada de dados diários.

Para realizar a simulação do balanço hídrico, o programa necessitou de dados diários de precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência (ET_o), armazenamento de água inicial do solo, coeficiente de cultivo (kc), capacidade de água disponível (CAD) e fração de água disponível (p), sendo esta última necessária para calcular a água disponível no solo (AD) para a cultura do *Pinus taeda* (Souza, 2008). Após a realização do BHA diário, as componentes ΔA_L e ER foram agrupadas em período de sete dias, para permitir a comparação com os valores obtidos no BHS.

Os valores diários de precipitação pluvial (mm dia^{-1}) foram os mesmos utilizados no BHS, sendo obtidos e corrigidos para a estação meteorológica da Lagoa (Telêmaco Borba-PR).

3.2.4.1 Evapotranspiração de referência (ET_o)

A ET_o foi estimada com o método de Penman-Monteith parametrizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO* (Allen et al., 1998) (Apêndice 4).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma_{psy} \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_{psy} \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Sendo: ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C⁻¹); R_n – radiação líquida na superfície (MJ m⁻² dia⁻¹); G – balanço do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ_{psy} – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); T – temperatura média do ar (°C); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s⁻¹); e_s – pressão de saturação de vapor (kPa); e_a – pressão atual do vapor (kPa).

3.2.4.2 Evapotranspiração da cultura (ET_c) e coeficiente de cultivo (kc)

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c) o modelo desenvolvido por Souza (2008) considera os seguinte procedimento:

$$ET_c = ET_o \cdot kc$$

Sendo: ET_c – a evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹); ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); kc – coeficiente de cultivo (adimensional).

Considerou-se no presente trabalho os seguintes valores de kc :

- Recomendado por Allen et al. (1998), denominado kc_A (Tabela A.1.2 do Apêndice 1). O valor proposto para o *Pinus taeda* é constante, pois sua morfologia não se altera consideravelmente em períodos curtos de tempo;
- Estimados com a equação proposta por Allen et al. (1998), que considera variáveis climáticas da região na sua determinação:

$$kc(DAP)_k = kc_A + [0,04 \cdot (u_2 - 2) - 0,004 \cdot (UR_{min} - 45)] \cdot \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3}$$

Sendo: $kc(DAP)_k$ – coeficiente de cultivo (adimensional); kc_A – coeficiente de cultivo recomendado por Allen et al. (1998) (adimensional) (Tabela A.1.2); u_2 – velocidade média do vento a 2 m de altura no respectivo período (médio ou final) (m s⁻¹); UR_{min} – umidade relativa mínima média diária ao longo do respectivo período (médio ou final) (%); h – altura média da planta (m) (Tabela A.1.2);

- Estimados a partir dos j -ésimos valores respectivos de ER (estimada no BHS) e ET_o , calculados na área experimental no ano de 2009 (Tabelas A.6.1 e A.6.2 do Apêndice 6). Foram determinados valores médios de kc semanais (kc_m) e mensais ($kc_{mês}$).

3.2.4.3 Capacidade de água disponível (CAD), água facilmente disponível no solo (AD) e fração de água disponível no solo (p)

Os cálculos do BHA foram realizados considerando CAD média de 174,0 mm, pois considerou-se que não houve variação na profundidade efetiva do sistema radicular, sendo calculada conforme a equação:

$$CAD = \sum_{i=1}^n (\theta_{CCi} - \theta_{PMPi}) \cdot z_i$$

Sendo: CAD – capacidade de água disponível no solo (mm); θ_{CCi} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo, na i -ésima profundidade da camada de solo ($m^3 m^{-3}$); θ_{PMPi} – umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente, na i -ésima profundidade da camada de solo ($m^3 m^{-3}$); z_i – i -ésima profundidade da camada de solo (mm); n – número de camadas no perfil de solo considerado.

O cálculo da água disponível no programa de Souza (2008) foi realizado com a fração de água disponível (fração p):

$$AD = CAD \cdot p$$

Sendo: AD – água facilmente disponível no solo (mm); CAD – capacidade de água disponível no solo (mm); p – fração de água disponível no solo (adimensional).

Foram testadas três formas de estimar a fração p :

– Fração p constante no tempo (p_A) (Tabela A.3.2 do Apêndice 3);

– Fração p diária estimada em função da ETc com a equação de Doorenbos & Kassan (1979):

$$p(ETc)_{DK} = 0,0025 \cdot ETc_i^2 - 0,0869 \cdot ETc_i + 1 \quad \text{para } 0 \leq ETc \leq 17 \text{ mm dia}^{-1}$$

Sendo: $p(ETc)_{DK}$ – fração de água disponível em função da ETc do i -ésimo dia (adimensional); ETc_i – evapotranspiração da cultura no i -ésimo dia ($mm \text{ dia}^{-1}$).

– Fração p diária estimada em função da ETc com a equação de Allen et al. (1998):

$$p(ETc)_A = p_A + 0,04 \cdot (5 - ETc_i) \quad \text{para } p_A \leq 0,8$$

Sendo: $p(ETc)_A$ – fração de água disponível em função da ETc do i -ésimo dia (adimensional); p_A – fração de água disponível base para a cultura (Allen et al., 1998) (adimensional); ETc_i – evapotranspiração da cultura no i -ésimo dia ($mm \text{ dia}^{-1}$).

3.2.4.4 Armazenamento de água no solo (A_L)

A estimativa do A_L e/ou “negativo acumulado” foi realizada utilizando a equação recomendada por Dourado Neto & Van Lier (1993).

– Se $CAD \cdot (1 - p) < A_L \leq CAD$, ou seja, na zona úmida, então:

$$A_L = CAD - L$$

– Senão, se $0 < A_L \leq CAD \cdot (1 - p)$, ou seja, na zona seca,

$$A_L = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{|L| - CAD \cdot p}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right\}$$

Sendo: CAD – capacidade de água disponível no solo (mm); A_L – armazenamento de água do solo (mm); L – valor do negativo acumulado (mm); p – fração de água disponível no solo para determinada cultura (adimensional).

O valor inicial do armazenamento da água no solo ($A_{L \text{ inicial}}$) para o ano de 2009 foi contabilizado ao longo do ano de 2008, sendo igual a 52,5 mm no dia 31 de dezembro de 2008.

3.2.5 Avaliação das componentes de saída do balanço hídrico agrícola

A comparação entre as componentes de saída do BHS ($\Delta A_{L(BHS)}$ e ER_{BHS}) e BHA ($\Delta A_{L(BHA)}$ e $ER_{(BHA)}$) foram realizadas empregando análise gráfica, medidas de tendência e dispersão, regressão linear, coeficiente de determinação (R^2), índice “ d ” de Willmott et al. (1985), índice “ c ” de Camargo & Sentelhas (1997), erro médio e erro absoluto médio (Apêndice 2). É importante observar que foram realizadas comparações com a ΔA_L e não com a A_L , pois a metodologia para obtenção do A_L no BHS (varia de θ_0 até θ_s) e BHA (varia de θ_{PMP} até θ_{CC}) são diferentes.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Precipitação e evapotranspiração de referência

A ET_0 no ano de 2009 apresentou tendência típica, com a variação temporal esperada ao longo do ano, tendo os menores valores no inverno e maiores no verão. A $P_{\text{média}}$, ao contrário, foi atípica em relação à P_{normal} (Nunes et al., 2009) da região de Telêmaco Borba-PR (Figura 3.4). A $P_{\text{média}}$ anual foi superior à P_{normal} apresentando valor total de 1.608,08 e

1.490,00 mm, respectivamente, havendo má distribuição das chuvas ao longo do ano de 2009 e acúmulo expressivo nos meses de setembro a dezembro. Caracterizado historicamente como mês de pouca precipitação, o mês de julho se destacou apresentando $P_{média}$ 38% superior à P_{normal} .

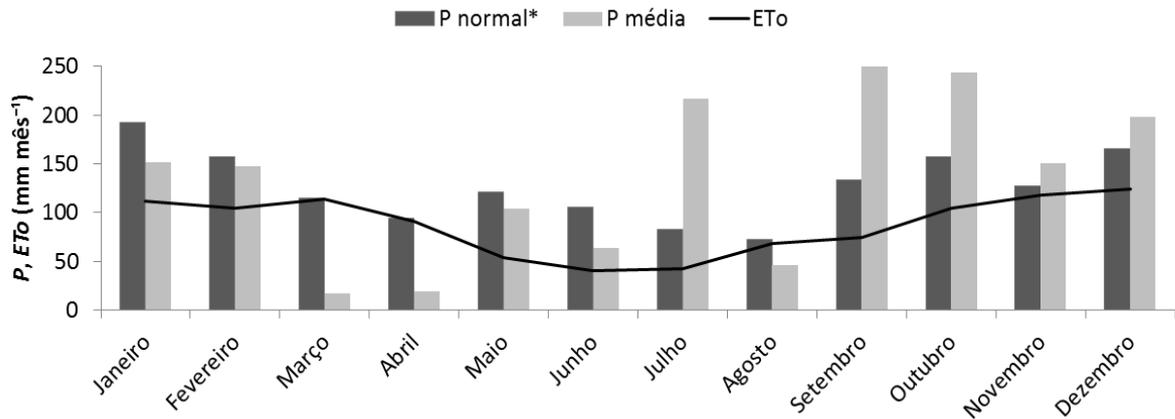


Figura 3.4 – Precipitação média mensal normal* (P_{normal}), precipitação mensal (P) e evapotranspiração de referência mensal (ETo), obtidas para estação meteorológica da Lagoa, em Telêmaco Borba-PR, no ano de 2009 (*Normais climatológicas observadas entre 1947 e 2005 para a região de Telêmaco Borba, conforme Nunes et al. (2009)).

É importante observar que deve-se considerar a atipicidade do ano nas análises dos resultados de $\Delta A_{L(BHA)}$ e ER_{BHA} , no ano de 2009, principalmente em relação à precipitação observada, em que houve valores muito abaixo (março e abril) ou acima (julho, setembro e outubro) da P_{normal} .

3.3.2 Tendência da variação do armazenamento de água no solo (ΔA_L) e evapotranspiração real (ER)

De modo geral houve aderência do $\Delta A_{L(BHA)}$ a $\Delta A_{L(BHS)}$ e ER_{BHA} a ER_{BHS} (Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7).

Não houve melhora expressiva na $\Delta A_{L(BHA)}$ nem na ER_{BHA} quando se utilizou o $kc(DAP)_k$ que estima valores diários de kc ao longo do desenvolvimento da cultura em relação ao kc constante (kc_A).

Não houve melhora na aderência dos valores medidos e estimados quando se variou a fração p diariamente ($p(ETc)_{DK}$ e $p(ETc)_A$) em relação ao valor de fração p constante (p_A) ao longo do tempo. É importante observar que no ano de 2009 a precipitação foi alta e o

armazenamento da água no solo permaneceu alto praticamente todo ano. Assim, a alteração proposta na metodologia para calcular a fração p diariamente não promoveu alteração nos resultados de $\Delta A_{L(BHA)}$ e ER_{BHA} , pois o solo ficou na zona úmida (ou seja, quando $A_L \geq CAD \cdot (1 - p)$) quase todo o período, e a $ER \cong ET_c$ nessa condição.

Quando se utilizou valores de kc periódicos, os resultados da $\Delta A_{L(BHA)}$ e ER_{BHA} tiveram melhor aderência. Não é possível definir graficamente qual dos dois kc 's ($kc_{mês}$ ou kc_m) teve melhor desempenho. Vale ressaltar que apesar da média dos valores de kc_A , $kc_{mês}$ e kc_m ser próxima, 0,95, 1,36, e 1,37, respectivamente, houve grande diferença entre a amplitude e variação dos valores de kc_A , $kc_{mês}$ e kc_m (Tabelas A.1.2, A.6.1 e A.6.2) ao longo do ano de 2009.

Os períodos em que mais ocorreram erros relacionaram-se com os de atipicidade da $P_{média}$, quando a chuva foi muito superior ou inferior à média histórica. Houve grandes divergências da $\Delta A_{L(BHA)}$ em relação a $\Delta A_{L(BHS)}$, principalmente quando a $P_{média}$ foi alta, e da ER_{BHA} em relação à ER_{BHS} , quando a P foi baixa. Comparando a Figura 3.4 com as Figuras 3.6c e 3.6d, percebeu-se que os maiores erros e, conseqüentemente as menores aderências de $\Delta A_{L(BHA)}$, ocorreram nos meses de julho e setembro, em que a $P_{média}$ superou a P_{normal} em 38 e 52%, respectivamente. Contudo, também houve divergências menores quando a situação se inverteu. Por exemplo, no mês de abril, caracterizado por $P_{média}$ total de apenas 19,5 mm, a aderência da $\Delta A_{L(BHA)}$ não seguiu a $\Delta A_{L(BHS)}$, tendo resultado contrário (Figura 3.5). No entanto, quando o período foi analisado mensalmente a variação desapareceu indicando que as funções analisadas ainda sofrem com o efeito da periodicidade da análise (Figuras 3.5c e 3.5d).

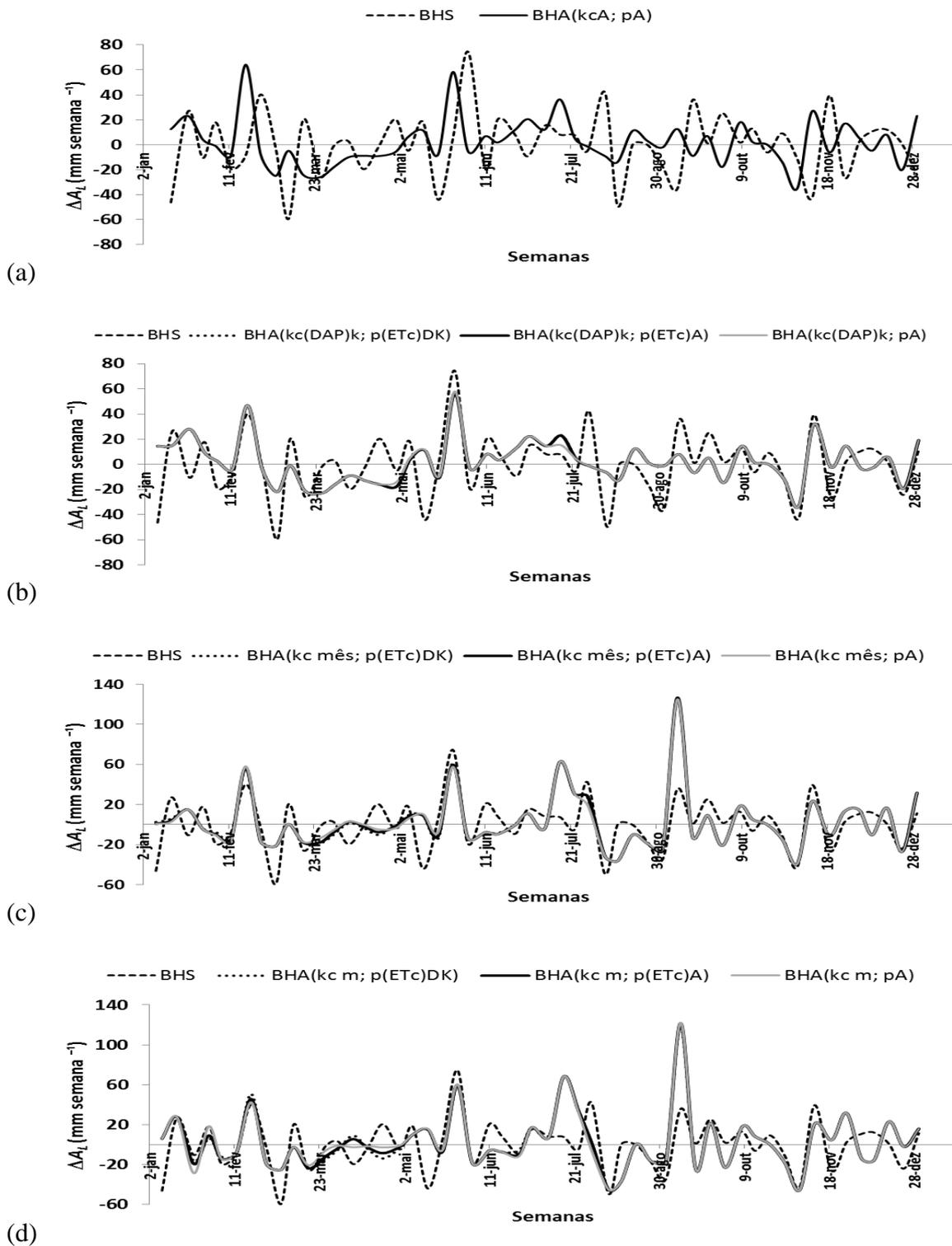


Figura 3.5 – Variação **semanal** do armazenamento da água no solo (ΔA_L), determinada a partir de balanços hídricos do solo (BHS) e agrícola (BHA), para a cultura do *Pinus taeda*, na região de Telêmaco Borba-PR, no ano de 2009: a) BHS e BHA(kc_A ; p_A); b) BHS e BHA ($kc(DAP)_k$; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A); c) BHS e BHA ($kc_{mês}$; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A); e, d) BHS e BHA (kc_m ; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A).

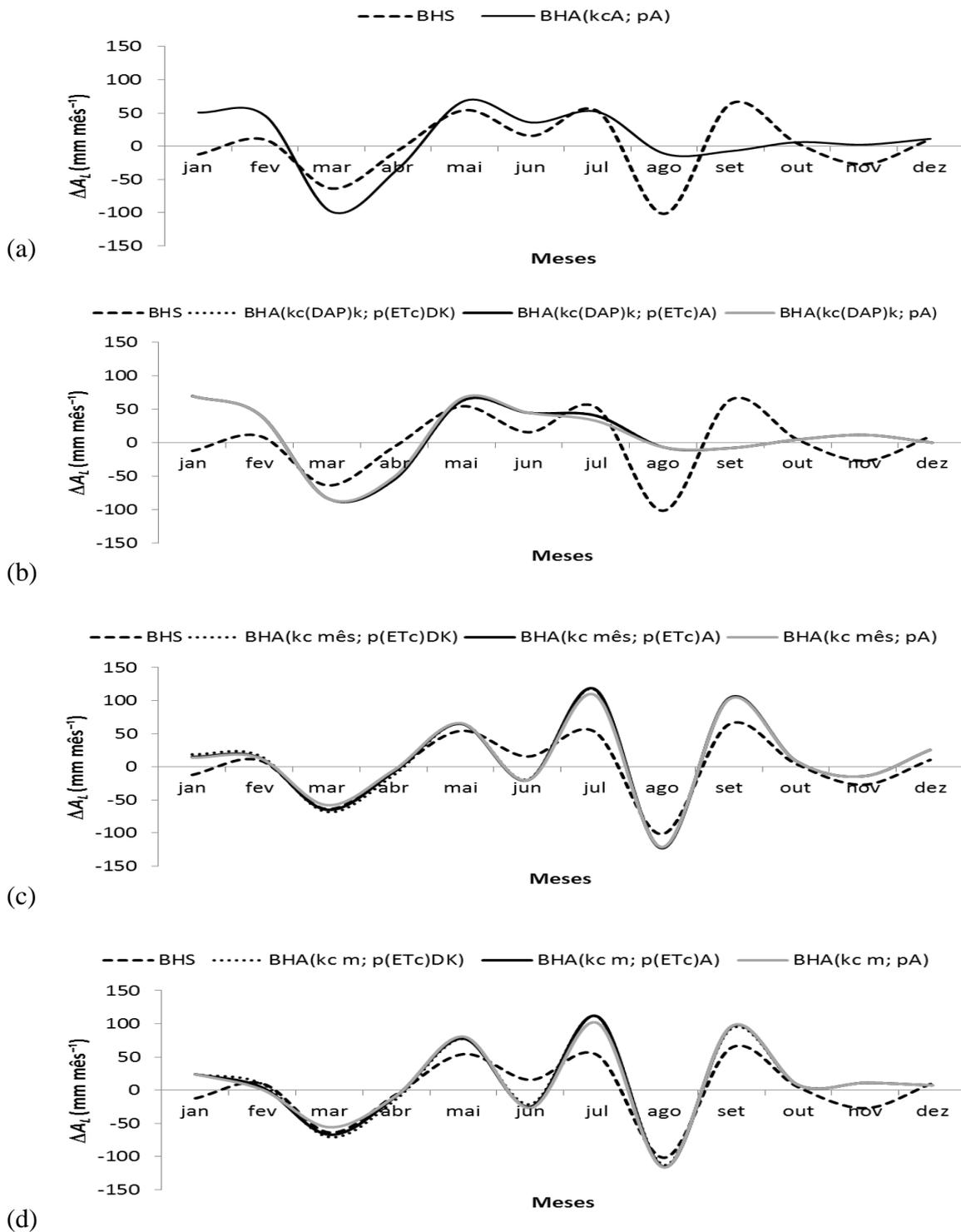


Figura 3.6 – Variação **mensal** do armazenamento da água no solo (ΔA_L), determinada a partir de balanços hídricos do solo (BHS) e agrícola (BHA), para a cultura do *Pinus taeda*, na região de Telêmaco Borba-PR, no ano de 2009: a) BHS e BHA (kc_A ; p_A); b) BHS e BHA ($kc(DAP)_k$; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A); c) BHS e BHA ($kc_{mês}$; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A); e, d) BHS e BHA (kc_m ; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A).

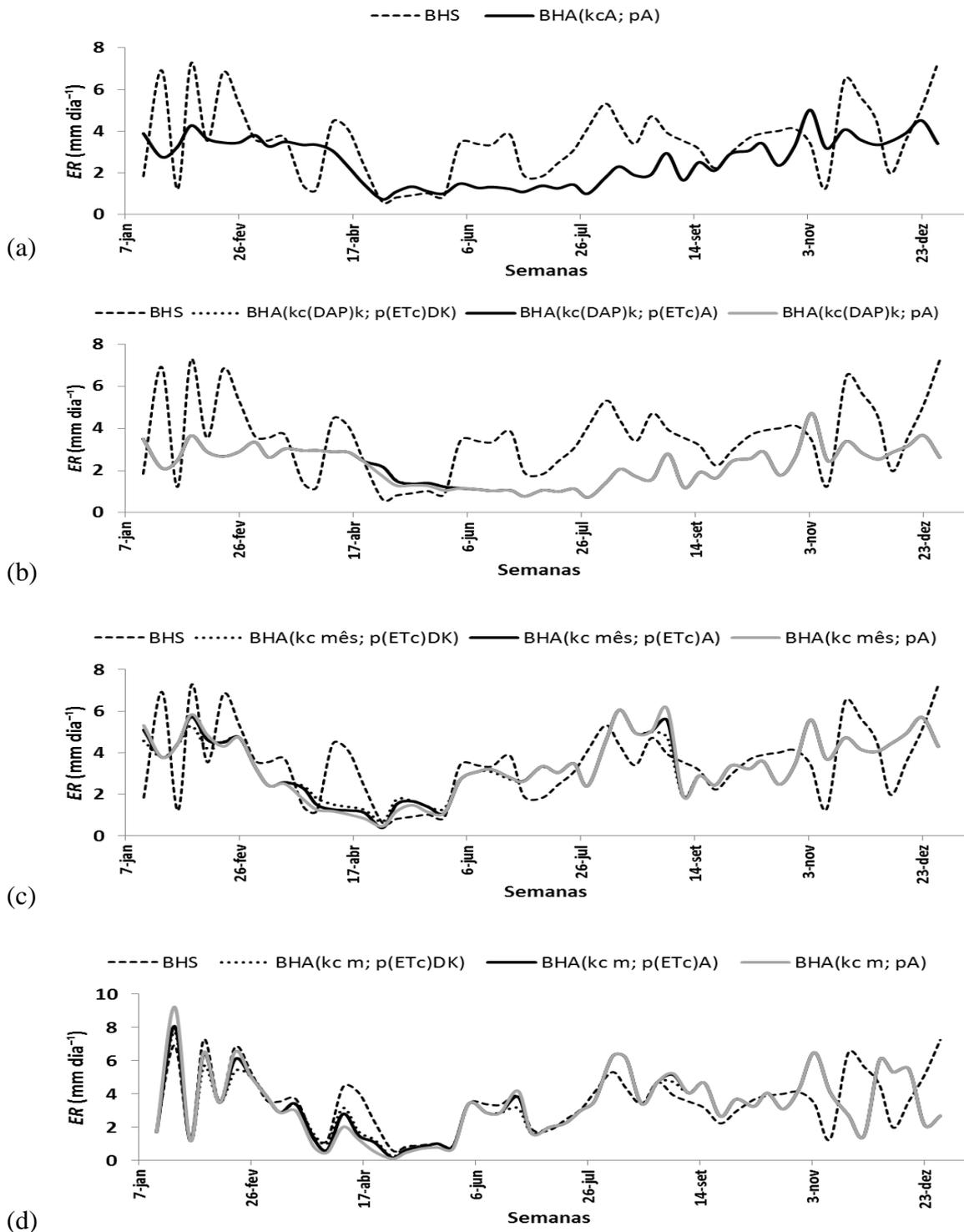


Figura 3.7 – Evapotranspiração real (ER), determinada a partir de balanços hídricos do solo (BHS) e agrícola (BHA) agrupados em periodicidade **semanal**, para a cultura do *Pinus taeda*, na região de Telêmaco Borba-PR, no ano de 2009: a) BHS e BHA (kc_A ; p_A); b) BHS e BHA (kc_k ; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A); c) BHS e BHA ($kc_{mês}$; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A); e, d) BHS e BHA (kc_m ; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A).

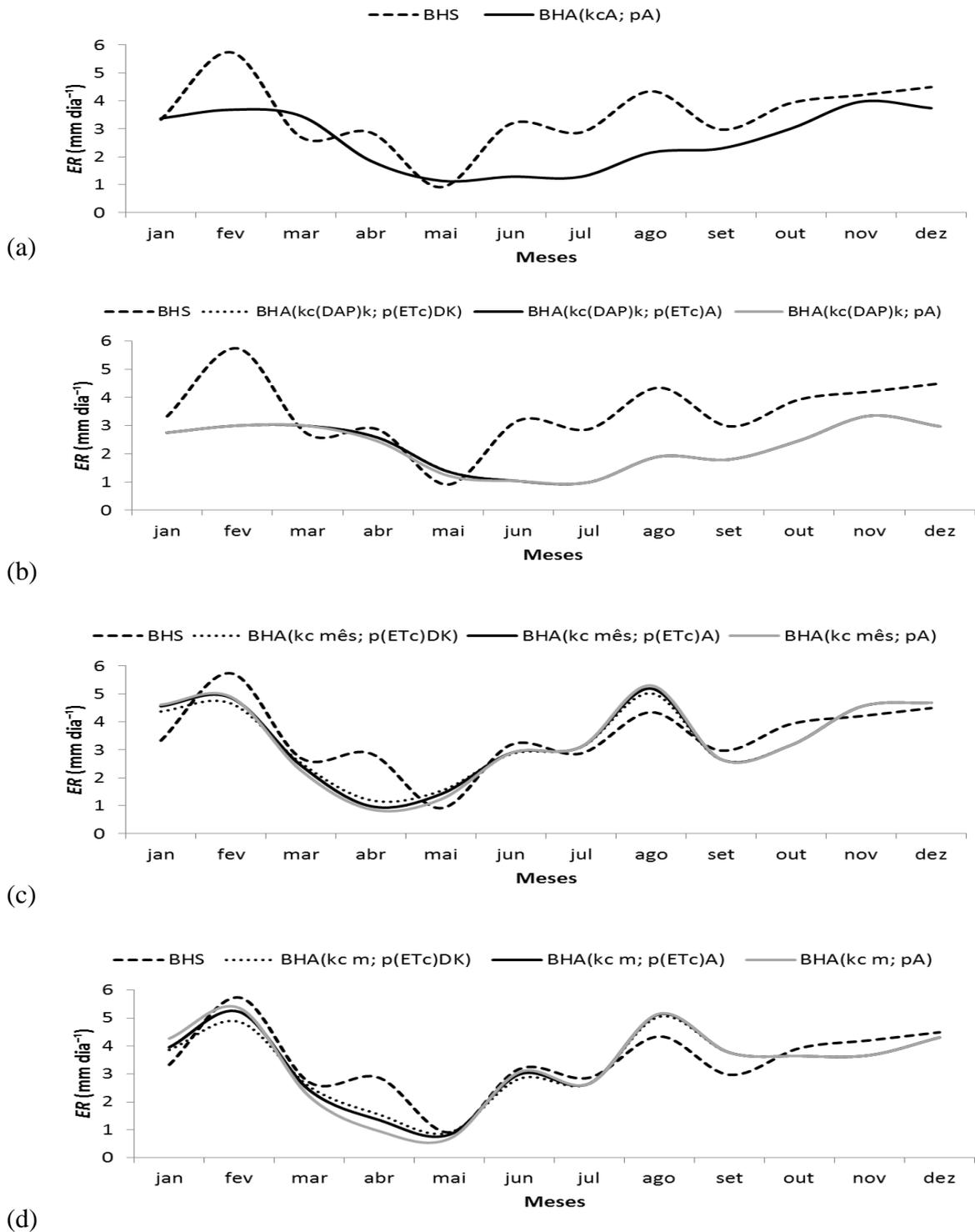


Figura 3.8 – Evapotranspiração real (ER), determinada a partir de balanços hídricos do solo (BHS) e agrícola (BHA) agrupados em periodicidade **mensal**, para a cultura do *Pinus taeda*, na região de Telêmaco Borba-PR, no ano de 2009: a) BHS e BHA (kc_A ; p_A); b) BHS e BHA ($kc(DAP)_k$; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A); c) BHS e BHA ($kc_{mês}$; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A); e, d) BHS e BHA (kc_m ; $p(ETc)_{DK}$, $p(ETc)_A$ ou p_A).

Para Souza et al. (2013), quando ocorrem períodos longos sem precipitação há o processo de secagem da água no solo, variando muito a umidade, principalmente nos primeiros 0,20 m de profundidade. A atmosfera apresenta grande déficit hídrico e o solo não consegue suprir tal demanda, porque a quantidade de água disponível na superfície fica restrita e a condutividade hidráulica começa a influenciar a evaporação. Nesta fase, a taxa de evaporação é controlada pelos mecanismos de transferência de vapor e de adsorção na matriz sólida no solo. Idso et al. (1974) a considera como terceira fase de secagem da camada superficial, por causa do estado muito seco em que a superfície do solo se encontra.

As diferenças entre a $\Delta A_{L(BHA)}$ e $\Delta A_{L(BHS)}$ podem ser explicadas por diversos fatores inerentes a cada metodologia. Pelo fato da $\Delta A_{L(BHA)}$ ser resultado de várias operações estimadas por programa e cada i -ésimo dia depender do armazenamento do dia anterior, sequencialmente. Além disso, simplificações são realizadas a fim de tornar possíveis os cálculos. A $\Delta A_{L(BHS)}$ é independente do período anterior, sendo medida diretamente no campo, por isso reflete melhor as condições do meio estudado. Como consequência, não há grande aderência nos valores de $\Delta A_{L(BHA)}$ quando analisados de forma semanal, sendo observada maior amplitude nos seus valores em relação aos dados analisados mensalmente (Figuras 3.5 e 3.6). O mesmo ocorreu em relação à ER_{BHA} (Figuras 3.7 e 3.8).

Em relação à ER_{BHA} os maiores erros ocorreram quando a $P_{média}$ foi inferior à P_{normal} , principalmente nos meses de março e abril. A ER_{BHA} teve seus maiores valores nos mesmos períodos em que ocorreram as maiores precipitações (Figuras 3.4, 3.7 e 3.8), concordando com Silva et al (2009), que obteve resultado semelhante para a cultura do milho, na região de Piracicaba-SP. Zhang et al. (2004) comentam que o A_L influencia diretamente a ER , na medida em que o déficit hídrico no solo reduz a ER . Liu et al. (2002) verificaram que o excedente hídrico ocasiona aumento na ER , e Farré & Faci (2006) observaram que os fatores que mais influenciam a ER são o A_L e P . O motivo deve-se à maior evaporação nas camadas superficiais até 0,40 m de profundidade (Cruz et al., 2005). Quando a ER_{BHA} foi muito baixa (março, abril e maio) houve pouca P , e as pequenas variações ocorridas nos meses vieram das camadas mais profundas (0,60 e 0,80 m), as quais apresentam maior capacidade de retenção, contribuindo para a absorção de água pelo sistema radicular da cultura (Souza et al., 2013).

Os BHA e BHS também estão sujeitos a outras fontes de erros: (a) A periodicidade dos cálculos sempre influencia os resultados. No BHS realizado, a periodicidade foi semanal, ou seja, os dados obtidos referem-se à soma (como na P) ou média (como na umidade) da semana, não sendo possível precisar o momento exato de obtenção dos dados; (b) No cálculo

dos BHA e BHS algumas simplificações também foram necessárias, como considerar a área plana, sem entrada ou saída de água do sistema via escoamento superficial e subsuperficial; (c) Considerou-se a área experimental homogênea, mas sabe-se que há variabilidade espacial dos parâmetros físicos do solo. Para Reichardt et al. (1979) a maior dificuldade na elaboração do BHS se encontra na estimativa da drenagem interna, obtida a partir da equação de Darcy, em razão dos erros cometidos na estimativa do gradiente de potencial e principalmente na escolha do valor da condutividade hidráulica do solo.

O BHA superestimou a $\Delta A_{L(BHA)}$ acumulada em relação à $\Delta A_{L(BHS)}$ e subestimou os valores totais de ER_{BHA} em todas as simulações analisadas. Contudo, é importante observar que ao longo do tempo se verificou valores alternados. Bruno et al. (2007), estudando o balanço hídrico do cafeeiro em Piracicaba-SP, verificou que a ER_{BHA} foi subestimada em média 12% em relação à ER_{BHS} , com os dados agrupados em períodos de 14 dias.

3.3.2 Análise estatística da variação do armazenamento de água no solo (ΔA_L) e evapotranspiração real (ER)

Não houve melhora significativa nos dados de $\Delta A_{L(BHA)}$ e ER_{BHA} quando se variou apenas os modelos de estimativa da fração p (Tabela 3.1 e 3.2), no entanto, notou-se melhora na aderência dos dados em relação ao BHS quando se utilizou diferentes kc 's. Também houve melhor aderência dos dados quando foram analisados e agrupados considerando periodicidade mensal em relação a semanal. A variação e erros ocorridos na periodicidade semanal foram compensados e diluídos na periodicidade mensal, respectivamente.

A $\Delta A_{L(BHA)}$ não se alterou nem com mudança dos diferentes kc 's, nem com diferentes modelos de fração p (Tabela 3.1). O $kc(DAP)_k$ não foi adequado para estimar a ER_{BHA} , porque apresentou menor aderência em relação ao kc constante (kc_A), inviabilizando a utilização da equação proposta por Allen et al. (1998) para o *Pinus taeda*. O kc semanal (kc_m) apresentou melhores resultados, ficando o kc mensal ($kc_{mês}$) em posição intermediária.

Mesmo quando analisados mensalmente, a $\Delta A_{L(BHA)}$ e ER_{BHA} tiveram menor aderência e maiores erros quando se utilizou a $kc(DAP)_k$ (Tabela 3.2). Desta forma, a função que considera dados climáticos realmente não foi adequada para estimar o kc para o *Pinus taeda* no ano de 2009, em Telêmaco Borba-PR. Bruno et al (2007) utilizando um kc constante, mas diferente de kc_A , no cálculo do BHA do café em Piracicaba-SP, com periodicidade de 14 dias,

obteve $R^2 = 0,7476$, para a $\Delta A_{L(BHA)}$, e $R^2 = 0,8386$, para a ER_{BHA} , evidenciando a necessidade de ter um kc adequado para o local de estudo.

Tabela 3.1. Análises estatísticas para variação do armazenamento da água no solo ($\Delta A_{L(BHS)}$ vs $\Delta A_{L(BHA)}$) e evapotranspiração real (ER_{BHS} vs ER_{BHA}), determinadas nos balanços hídricos do solo (BHS) e agrícola (BHA) agrupados em periodicidade **semanal**, para a cultura do *Pinus taeda*, na região de Telêmaco Borba-PR, no ano de 2009.

Análises	$\Delta A_{L(BHS \text{ vs } BHA)}$	$ER_{(BHS \text{ vs } BHA)}$	$\Delta A_{L(BHS \text{ vs } BHA)}$	$ER_{(BHS \text{ vs } BHA)}$	$\Delta A_{L(BHS \text{ vs } BHA)}$	$ER_{(BHS \text{ vs } BHA)}$
	BHS vs BHA($kc(DAP)_k; p(ETc)_{DK}$)		BHS vs BHA($kc(DAP)_k; p(ETc)_A$)		BHS vs BHA($kc(DAP)_k; p_A$)	
R ²	0,3518	0,0880	0,3522	0,0887	0,3602	0,1080
"d"	0,7371	0,4809	0,7373	0,4815	0,7409	0,4968
"c"	0,4372	0,1426	0,4376	0,1434	0,4447	0,1633
Desempenho	Mau	Péssimo	Mau	Péssimo	Mau	Péssimo
EM	1,1667	-1,2519	1,1667	-1,2527	1,1667	-1,2740
EAM	16,3575	1,7735	16,3474	1,7727	16,0579	1,7514
	-- BHS vs BHA($kc_{mês}; p(ETc)_{DK}$) --		-- BHS vs BHA($kc_{mês}; p(ETc)_A$) --		-- BHS vs BHA($kc_{mês}; p_A$) --	
R ²	0,3728	0,2947	0,3731	0,2860	0,3629	0,2817
"d"	0,7661	0,7206	0,7661	0,7233	0,7609	0,7234
"c"	0,4678	0,3912	0,4679	0,3868	0,4584	0,3839
Desempenho	Mau	Péssimo	Mau	Péssimo	Mau	Péssimo
EM	1,3873	-0,1175	1,4201	-0,1019	1,4222	-0,1261
EAM	18,0565	1,2307	17,9810	1,2519	18,0731	1,2532
	--- BHS vs BHA($kc_m; p(ETc)_{DK}$) ---		--- BHS vs BHA($kc_m; p(ETc)_A$) ---		--- BHS vs BHA($kc_m; p_A$) ---	
R ²	0,3325	0,3648	0,3411	0,3921	0,3424	0,3975
"d"	0,7450	0,7838	0,7487	0,7968	0,7498	0,7952
"c"	0,4296	0,4734	0,4373	0,4989	0,4387	0,5014
Desempenho	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau	Sofrível
EM	1,3658	-0,1655	1,3679	-0,1408	1,3679	-0,1639
EAM	18,0477	1,0121	17,5566	1,0106	17,2574	1,0966
	--- BHS vs BHA($kc_A; p_A$) ---					
R ²	—	—	—	—	0,3752	0,1857
"d"	—	—	—	—	0,7603	0,5710
"c"	—	—	—	—	0,4657	0,2461
Desempenho	—	—	—	—	Mau	Péssimo
EM	—	—	—	—	1,2661	-0,9071
EAM	—	—	—	—	16,4270	1,4994

Tabela 3.2. Análises estatísticas para variação do armazenamento da água no solo ($\Delta A_{L(BHS)}$ vs $\Delta A_{L(BHA)}$) e evapotranspiração real (ER_{BHS} vs ER_{BHA}), determinadas nos balanços hídricos do solo (BHS) e agrícola (BHA) agrupados em periodicidade **mensal**, para a cultura do *Pinus taeda*, na região de Telêmaco Borba-PR, no ano de 2009.

Análises	$\Delta A_{L(BHS \text{ vs } BHA)}$	$ER_{(BHS \text{ vs } BHA)}$	$\Delta A_{L(BHS \text{ vs } BHA)}$	$ER_{(BHS \text{ vs } BHA)}$	$\Delta A_{L(BHS \text{ vs } BHA)}$	$ER_{(BHS \text{ vs } BHA)}$
	BHS vs BHA($kc(DAP)_k; p(ETc)_{DK}$)		BHS vs BHA($kc(DAP)_k; p(ETc)_A$)		BHS vs BHA($kc(DAP)_k; p_A$)	
R ²	0,2150	0,2843	0,2150	0,2859	0,2109	0,3223
"d"	0,6544	0,5620	0,6543	0,5626	0,6507	0,5743
"c"	0,3034	0,2996	0,3034	0,3008	0,2988	0,3260
Desempenho	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo
EM	10,1250	-1,1946	10,1250	-1,1954	10,1250	-1,2183
EAM	37,2258	1,3202	37,2637	1,3196	37,9119	1,3185
	-- BHS vs BHA($kc_{mês}; p(ETc)_{DK}$) --		-- BHS vs BHA($kc_{mês}; p(ETc)_A$) --		-- BHS vs BHA($kc_{mês}; p_A$) --	
R ²	0,8936	0,6462	0,8923	0,6411	0,8982	0,6459
"d"	0,9397	0,8901	0,9395	0,8848	0,9461	0,8816
"c"	0,8883	0,7155	0,8874	0,7085	0,8967	0,7085
Desempenho	Ótimo	Bom	Ótimo	Bom	Ótimo	Bom
EM	9,8410	-0,1038	9,8410	-0,0867	9,8410	-0,1110
EAM	20,7934	0,6188	19,8307	0,6440	19,0682	0,6647
	--- BHS vs BHA($kc_m; p(ETc)_{DK}$) ---		--- BHS vs BHA($kc_m; p(ETc)_A$) ---		--- BHS vs BHA($kc_m; p_A$) ---	
R ²	0,8540	0,7647	0,8458	0,7733	0,8401	0,7346
"d"	0,9346	0,9291	0,9311	0,9304	0,9332	0,9102
"c"	0,8636	0,8125	0,8563	0,8182	0,8553	0,7802
Desempenho	Ótimo	Muito bom	Ótimo	Muito bom	Ótimo	Muito bom
EM	10,1250	-0,1557	10,1250	-0,1302	10,1250	-0,1492
EAM	21,0284	0,4960	21,6797	0,5010	21,9637	0,5743
					--- BHS vs BHA($kc_A; p_A$) ---	
R ²	—	—	—	—	0,3303	0,4291
"d"	—	—	—	—	0,7339	0,6923
"c"	—	—	—	—	0,4218	0,4535
Desempenho	—	—	—	—	Mau	Mau
EM	—	—	—	—	10,0835	-0,8588
EAM	—	—	—	—	32,5939	1,0299

Os menores e maiores erros absolutos médios (EAM) da ER_{BHA} ocorreram com a utilização da fração $p(DAP)_{DK}$ (Tabela 3.2) e p_A , respectivamente, indicando que estimativas diárias da fração p melhoraram a estimativa da ER_{BHA} .

Não houve diferença nos resultados da $\Delta A_{L(BHA)}$ utilizando o $kc_{mês}$ ou kc_m (Tabela 3.2), indicando que o BHA semanal, utilizando kc_m , não melhorou acentuadamente as estimativas.

Contudo, o mesmo não se verificou para a ER_{BHA} , em que se verificou melhora com o aumento da periodicidade do kc .

A $\Delta A_{L(BHA)}$ pode ter sido influenciada pela serapilheira do pinus, devido a sua baixa massa específica e alto potencial de retenção de água. A serapilheira forma uma camada dissipadora de energia, diminuindo as perdas por evaporação do solo para a atmosfera, mas tem a desvantagem de interceptar e armazenar a água proveniente da precipitação, que posteriormente é perdida diretamente para a atmosfera sem entrar no perfil do solo. Segundo Silva et al. (2006), a água evaporada no sistema solo-planta correlaciona-se significativamente com a água inicialmente armazenada na palhada. Os autores verificaram que 1, 4 e 8 t ha⁻¹ de palhada de milho com 412, 255 e 260% de umidade em relação ao seu volume, respectivamente, perderam grande quantidade de água armazenada, chegando a 0, 41 e 53%, respectivamente. O armazenamento de água na palhada é mais uma fonte de erro no BHA realizado, pois toda água proveniente da precipitação (menos a interceptação) foi considerada como entrada no sistema e o mesmo não ocorre na contabilização do BHS. Além disso, outros fatores são influenciados pela serapilheira, como a entrada de radiação solar no sistema, temperatura, escoamento superficial, *ETc*, entre outros.

3.4 CONCLUSÕES

- O emprego de valores de coeficiente de cultivo e fração de água disponível no solo diários melhoram a estimativa do balanço hídrico agrícola do *Pinus taeda*, tornando-o mais sensível às mudanças morfoclimáticas locais e, conseqüentemente, mais confiável para o planejamento agrícola;
- O uso dos valores estimados de kc_m e $p(ETc)_{DK}$ possibilitam melhor ajustamento aos valores do balanço hídrico do solo, refletidos nas componentes de saída, como evapotranspiração real e armazenamento de água no solo;
- O balanço hídrico agrícola subestima o valor total da evapotranspiração real do *Pinus taeda* e superestima a variação do armazenamento de água no solo acumulada em relação ao balanço hídrico do solo;
- As funções de estimativa diária da fração p no balanço hídrico agrícola não alteram os valores de variação no armazenamento de água no solo e evapotranspiração real, quando o solo se encontra na zona úmida.

3.5 LITERATURA CITADA

ADAMUCHIO, J. G. Respostas de um balanço hídrico devido às periodicidades e equações de estimativa do armazenamento da água no solo. Curitiba, 2011. 253p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. 1 ed. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p.

BRUNO, I. P.; SILVA, A. L.; REICHARDT, K.; DOURADO-NETO, D.; BACCHI, O. O. S. & VOLPE, C. A. Comparison between climatological and field water balances for a coffee crop. *Scientia Agricola*, 64(3), 215-220, 2007.

CAMARGO, A. P. & SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAVIGLIONE, J. H; KIIHL, L. R. B; CARAMORI, P. H; OLIVEIRA, D. Cartas climáticas do Paraná. Londrina, IAPAR, 2000. Disponível em <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677> Acesso em 18 Jan. 2013.

CRUZ, A. C. R.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A. & ROCHA, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.1-10, 2005.

DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. Yield response to water. Roma: FAO. (Irrigation and Drainage Paper, 33). 1979. 193p.

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

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Scientia Agricola*, 57: 191-192, 2001.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, SNLCS, 1997.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.

FARRÉ, I. & FACI, J. M. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, v.83, p.135-143, 2006.

FEZER, K. M. Atributos físico-hídricos do solo e relações hídricas para cultura do Pinus taeda e mata nativa sob Latossolo, em Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Curitiba, 2013. 62p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

HILLEL, D. Environmental soil physics. San Diego: Elsevier. Academic Press Inc., 413 p. 1980.

IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; KIMBALL, B. A. & NAKAYAMA, F. S. The three stages of drying of field soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.38, p.831-835, 1974.

- JI, X. B.; KANG, E. S.; CHEN, R. S.; ZHAO, W. Z.; ZHANG, Z. H.; JIN, B. W. A mathematical model for simulating water balances in cropped sandy soil with conventional flood irrigation applied. *Agricultural Water Management*, v. 87, p. 337–346, 2007.
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 335p.
- LIU, W. Z.; HUNSAKER, D. J.; LI, Y. S.; XIE, X. Q. & WALL, G. W. Interrelations of yield, evapotranspiration, and water use efficiency from marginal analysis of water production functions. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 56, p. 143-151, July, 2002.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12:513-522, 1976.
- NUNES, J. S. N.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; FIER, I. S. N. & SANTOS, C. C. Climatologia do comportamento da precipitação no distrito florestal de Monte Alegre, PR, Brasil *Revista Floresta* 39:783-792, 2009.
- PACHECHENIK, P. E. Demanda hídrica em plantio de pinus e em uma floresta nativa, na região de Telêmaco Borba. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010. 111p. (Tese Doutorado).
- PEREIRA, A.R.; VILA NOVA, N. A. & SEDYIAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: ESALQ. 1997. 183p.
- PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V; ZUCCO, E.; DEPINÉ, H.; CASTRO, N. M. R.; SOARES, P. A. & PERAZZOLI, M. Avaliação das variáveis hidrológicas do balanço hídrico em área agrícola com cultivo de milho (*Zea mays*) através de uso de lisímetro. *REA – Revista de estudos ambientais (Online)*, v.12, n. 1, p. 73-81, jan./jun. 2010.
- PRAVEENA, S. M.; ABDULLAH, M. H.; BIDIN, K. & ARIS, A. Z. Modeling of water balance components in a small island via a numerical model application. *Journal of Coastal Research*, v. 28(1): 202-209. 2012.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P. L.; SAUNDERS, L. C. U. & CADIMAZ, A. Dinâmica da água em solo cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.3, p.1-5, 1979.
- REICHARDT, K. & TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manoele, 2004. 478p.
- SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T. & ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.4, nº 3, p.142–149, 2010.
- SCHERAIBER, C. F. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola. Curitiba, 2012. 153p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- SILVA, M. M.; LIBARDI, P. L. & FERNANDES, F. C. S. Nitrogen doses and water balance components at phenological stages of corn. *Scientia agricola*, Piracicaba, v. 66, n. 4, Aug., 2009.
- SILVA, F. A. M.; SILVEIRA PINTO, H.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M. & AFFHOLDER, F. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milheto e soja utilizadas em plantio direto. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.41, n.5, p.717-724, maio, 2006.
- SOUZA, J. L. M. Programa *MORETTI* - Módulo balanço hídrico sequencial (periodicidade: 1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias), Versão 1.0, 2008.

SOUZA, C.; ANDRADE, A. P. A.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S. & SILVA, I. F. Balanço hídrico da cultura da mamona sob condições de sequeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.1, p.3–10, 2013.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society America Journal*, 44:892-898, 1980.

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

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J. & ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

CONCLUSÃO GERAL

As funções de coeficiente de cultivo (kc) obtidas, que variam conforme os dias após plantio, melhoram a estimativa da evapotranspiração da cultura, por refletirem melhor as condições locais, em comparação com os valores de kc comumente utilizados na literatura. Não se encontrou um modelo de estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular (z) que possa ser utilizado generalizadamente, no entanto, os fatores que mais influenciam a z em diferentes tipos climáticos foram identificados, possibilitando o estabelecimento dos melhores modelos para a cana-de-açúcar, feijão e milho. O emprego de valores de kc e fração de água disponível no solo diários melhoram a estimativa do balanço hídrico agrícola do *Pinus taeda*, tornando-o mais sensível às mudanças morfoclimáticas locais, porque possibilita melhor ajustamento aos valores do balanço hídrico do solo, refletidos nas componentes de saída, como evapotranspiração real e armazenamento de água no solo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A demanda de dados no setor agrícola brasileiro é crescente e necessária. Dependendo da situação e local, estimativas de componentes hídricas são extremamente dependentes de dados empíricos para comprovar seus limites, mas são excelentes alternativas para contornar problemas técnicos e de custos na agricultura. Além disso, podem ser úteis para fins de planejamento e manejo de culturas agrícolas que são de difícil predição devido às variáveis climáticas.

Devido a sua complexidade, o balanço hídrico agrícola é muito variável entre regiões e culturas. Por isso, faz-se necessário testar modelos e funções para outras culturas e regiões do Brasil, até pela sua diversidade de clima e solo, permitindo melhor compreensão de como as estimativas interferem nas componentes hídricas (evapotranspiração real, armazenamento de água no solo, déficit hídrico, excedente hídrico, entre outras).

Uma das principais aplicações práticas do balanço hídrico agrícola, por sua facilidade de estimativa e uso, é o zoneamento agroclimático de culturas. Um grande problema detectado atualmente é que o zoneamento é realizado a partir de poucos dados e o balanço hídrico poderia auxiliar a melhorar sua precisão, a partir da inserção de mais variáveis que afetam a produtividade das culturas, inclusive estabelecendo a variabilidade espacial dos riscos inerentes a cada cultura e local.

APÊNDICE 1

Tabela A.1.1. Valores de coeficiente de cultivo (kc) para cada estágio de desenvolvimento das culturas do amendoim, cana-de-açúcar, milho, soja e *pinus taeda*, conforme Doorenbos & Kassan (1979).

Cultura	----- Coeficientes de cultivo (kc) -----			
	kc_I	kc_{II}	kc_{III}	kc_{IV}
Amendoim	0,50	0,80	1,10	0,85
Cana-de-açúcar	0,45	0,85	1,15	0,775
Feijão	0,35	0,80	1,15	0,70
Milho	0,40	0,825	1,125	0,875
Soja	0,35	0,75	1,075	0,75
<i>Pinus taeda</i>	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela A.1.2. Valores de coeficiente de cultivo (kc) para cada estágio de desenvolvimento, duração do estágio de desenvolvimento inicial (DAP_{ini}) e número de vezes que houve precipitação no estágio de desenvolvimento inicial (n_w) das culturas do amendoim, cana-de-açúcar, milho, soja e *pinus taeda*, conforme Allen et al. (1998).

Cultura	DAP_{ini}	n_w	----- Coeficientes de cultivo (kc) -----			Altura da cultura (m)
			kc_{ini}	kc_{med}	kc_{fin}	
Amendoim	15	2	0,40	1,15	0,60	0,40
Cana-de-açúcar	50	9	0,40	1,25	0,75	3,00
Feijão	25	3	0,40	1,15	0,35	1,00
Milho	20	2	0,30	1,20	0,35	2,00
Soja	15	4	0,40	1,15	0,50	1,00
<i>Pinus taeda</i>	-----	-----	0,95	0,95	0,95	10,00

Tabela A.1.3. Valores médios de coeficiente de cultivo (kc) para cultura do amendoim, obtidos em tanque Classe e lisímetros de pesagem, Rodelas-BA, conforme os dias após o plantio (DAP) (Silva & Rao, 2006).

Estádio de desenvolvimento	DAP	kc
I	20	0,84
II	50	0,74
III	75	1,14
IV	91	1,90

Tabela A.1.4. Valores médios de coeficiente de cultivo (kc) para cultura da cana-de-açúcar, obtidos em lisímetro de pesagem, em Juazeiro-BA, conforme os dias após o plantio (DAP) (Silva et al. 2012).

----- Estádio de desenvolvimento -----		DAP	kc
Brotação	Inicial	0-30	0,65
Desenvolvimento	Desenvolvimento	31-109	0,925
Crescimento	Intermediário	110-347	1,10
Maturação	Final	348-390	0,85

Tabela A.1.5. Valores médios de coeficiente de cultivo (kc) para cultura do feijão, obtidos em evapotranspirômetros, em Campinas-SP, conforme os dias após o plantio (DAP) (Medeiros et al. 2000).

DAP	kc
0-13	0,3636
14-18	0,4694
37-23	0,6679
51-31	0,9808
65-36	1,1446
78-41	1,1912
42-46	1,2841
47-51	1,3113
52-56	1,4971
57-64	1,6729
65-69	1,2444
70-80	0,9517
81-85	0,7727

Tabela A.1.6. Valores médios de coeficiente de cultivo (kc) para cultura do milho, obtidos em lisímetro de pesagem, em Piracicaba-SP, conforme os dias após o plantio (DAP) (Detomini et al. 2010).

Estádio de desenvolvimento	DAP	kc
Até 4 folhas visíveis	0-18	0,32
4 a 8 folhas visíveis	19-37	1,07
8 a 12 folhas visíveis	37-50	1,50
Pendoamento e florescimento	51-64	1,43
Final do florescimento a grãos pastosos	65-77	1,25
Grãos pastosos a grãos farináceos	78-89	1,01
Grãos farináceos a grãos duros	90-99	0,39
Grãos duros ao ponto de maturação fisiológica	100-110	0,23

Tabela A.1.7. Valores médios de coeficiente de cultivo (kc) para a cultura da soja, obtidos em lisímetro de pesagem, em Brasília-DF, conforme os dias após o plantio (DAP) (Mendes, 2006).

Estádio de desenvolvimento	DAP	kc
I	7	0,45
II	14	0,79
III	21	0,58
IV	28	0,83
V	35	0,71
VI	42	0,94
VII	49	0,96
VIII	56	1,05
IX	63	1,06
X	70	1,02
XI	77	1,32
XII	84	1,23
XIII	91	1,30
XIV	98	1,21
XV	105	1,16
XVI	112	1,36
XVII	119	1,56
XVIII	126	1,08
XIX	133	0,96
XX	140	0,58

Tabela A.1.8. Valores médios de coeficiente de cultivo (kc) para cultura do *Pinus taeda*, obtidos em um balanço hídrico do solo no ano de 2009, em Telêmaco Borba-PR. (Pachechenik, 2010) ⁽¹⁾

Semana	Data	kc_m (adimensional)	Semana	Data	kc_m (adimensional)
1	—	—	27	09/07/2009	1,38
2	15/01/2009	0,42	28	16/07/2009	1,69
3	23/01/2009	3,18	29	23/07/2009	2,00
4	30/01/2009	0,35	30	29/07/2009	3,42
5	05/02/2009	1,45	31	06/08/2009	3,36
6	12/02/2009	0,91	32	12/08/2009	2,54
7	19/02/2009	1,83	33	19/08/2009	1,72
8	26/02/2009	1,39	34	26/08/2009	2,34
9	05/03/2009	0,96	35	02/09/2009	1,77
10	11/03/2009	0,84	36	09/09/2009	1,48
11	18/03/2009	1,01	37	16/09/2009	1,20
12	26/03/2009	0,47	38	23/09/2009	1,01
13	01/04/2009	0,29	39	30/09/2009	1,15
14	08/04/2009	1,28	40	08/10/2009	1,25
15	15/04/2009	1,25	41	14/10/2009	1,23
16	22/04/2009	0,76	42	21/10/2009	1,22
17	30/04/2009	0,27	43	28/10/2009	1,20
18	06/05/2009	0,41	44	04/11/2009	0,64
19	13/05/2009	0,48	45	11/11/2009	0,39
20	20/05/2009	0,54	46	19/11/2009	1,72
21	27/05/2009	0,57	47	26/11/2009	1,44
22	03/06/2009	2,19	48	03/12/2009	1,34
23	11/06/2009	2,13	49	09/12/2009	0,45
24	17/06/2009	2,07	50	16/12/2009	0,77
25	25/06/2009	3,32	51	23/12/2009	1,08
26	01/07/2009	1,43	52	30/12/2009	1,83

⁽¹⁾ Pachechenik (2010) não determinou os valores de kc , mas autorizou e disponibilizou dados experimentais que permitiram calcular os valores em um balanço hídrico do solo considerando os fluxos verticais.

Tabela A.1.9. Características típicas de umidade em diferentes tipos de solo (Allen et al. 1998).

Tipo de solo (USDA)	θ_{PMP} ⁽¹⁾ ----- (m ³ m ⁻³) -----	θ_{cc} ⁽²⁾ -----	AFE ⁽³⁾ (mm)	AET ⁽⁴⁾ (mm)
Arenoso	0,02 - 0,07	0,07 - 0,17	2 - 7	6 - 12
Franco arenoso	0,06 - 0,16	0,18 - 0,28	6 - 10	15 - 20
Franco	0,07 - 0,17	0,20 - 0,30	8 - 10	16 - 22
Franco siltoso	0,09 - 0,21	0,22 - 0,36	8 - 11	18 - 25
Siltoso	0,12 - 0,22	0,28 - 0,36	8 - 11	22 - 26
Franco argilosiltoso	0,17 - 0,24	0,30 - 0,37	8 - 11	22 - 27
Argilosiltoso	0,17 - 0,29	0,30 - 0,42	8 - 12	22 - 28
Argiloso	0,20 - 0,24	0,32 - 0,40	8 - 12	22 - 29

⁽¹⁾ Umidade volumétrica do solo no ponto de murchamento permanente; ⁽²⁾ Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo; ⁽³⁾ AFE – água facilmente evaporável; ⁽⁴⁾ AET – água evaporável total (mm);

APÊNDICE 2

Para verificar a concordância, desempenho e erro entre as variáveis observadas e estimadas foram feitas as seguintes análises:

(a) Índice “ d ” proposto por Willmott et al. (1985):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (|v_i - \bar{v}_o| + |v_{oi} - \bar{v}_o|)^2} \right]$$

Sendo: d – índice de concordância de Willmott et al. (1985); v_i – variável estimada no i -ésimo dia; v_{oi} – variável observada no i -ésimo dia; \bar{v}_o – média da variável observada no período considerado.

(b) Índice “ c ” proposto por Camargo & Sentelhas (1997):

$$c = |R \cdot d|$$

Sendo: c – índice “ c ” de desempenho proposto por Camargo & Sentelhas (1997) (adimensional); R – coeficiente de correlação (adimensional) obtido na regressão (adimensional); d – índice “ d ” de concordância proposto por Willmott et al. (1985) (adimensional).

O critério de interpretação do índice “ c ” tem os seguintes desempenhos: ótimo (“ c ” > 0,85); muito bom ($0,75 < “c” \leq 0,85$); bom ($0,65 < “c” \leq 0,75$); mediano ($0,60 < “c” \leq 0,65$); sofrível ($0,50 < “c” \leq 0,60$); mau ($0,40 < “c” \leq 0,50$); e, péssimo (“ $c” \leq 0,40$).

(c) Erro médio (EM) e absoluto médio (EAM)

$$EM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (v_i - v_{oi})$$

$$EAM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (|v_i - v_{oi}|)$$

Sendo: EM – erro médio; EAM – erro absoluto médio; n – número de observações (adimensional); v_i – variável estimada no i -ésimo dia; v_{oi} – variável observada no i -ésimo dia.

APÊNDICE 3

Tabela A.3.1. Valores de profundidade efetiva mínima (z_{min}) e máxima ($z_{máx}$) propostos para as culturas do milho, feijão e cana-de-açúcar por Allen et al., (1998).

Cultura	$z_{mín}$ (m)	$z_{máx}$ (m)
Cana-de-açúcar	0,10	2,00
Feijão	0,03	0,50
Milho	0,03	0,70

Tabela A.3.2. Valores de fração de água disponível (p_A) propostos por Allen et al. (1979), para diversas culturas agrícolas.

Cultura	p_A (adimensional)
Milho	0,55
Feijão	0,50
Cana-de-açúcar	0,65
<i>Pinus taeda</i>	0,70

Tabela A.3.3. Valores de fração de água disponível propostos por Doorenbos & Kassan (1979), em função da evapotranspiração de cultura (ET_c), para as culturas do milho, feijão e cana-de-açúcar.

ET_c (mm dia ⁻¹)	Fração p (adimensional)
0	1,000
2	0,875
3	0,800
4	0,700
5	0,600
6	0,550
7	0,500
8	0,450
9	0,425
10	0,400

APÊNDICE 4

Estimativa da ET_o (mm dia⁻¹) com o método de Penman-Monteith

A estimativa da ET_o (mm dia⁻¹) com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO (Allen et al., 1998), foi realizada com a equação:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma_{psy} \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_{psy} \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Sendo: ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C⁻¹); R_n – radiação líquida na superfície (MJ m⁻² dia⁻¹); G – balanço do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ_{psy} – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); T – temperatura média do ar (°C); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s⁻¹); e_s – pressão de saturação de vapor (kPa); e_a – pressão atual do vapor (kPa).

A constante psicrométrica (γ_{psy}) foi obtida por meio da seguinte equação:

$$\gamma_{psy} = a_{psy} \cdot P$$

Sendo: γ_{psy} – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); a_{psy} – coeficiente dependente do tipo de ventilação do bulbo úmido ($a_{psy} = 0,0008$ °C⁻¹ para psicrômetros de ventilação natural); P – pressão atmosférica (kPa).

A determinação da pressão atmosférica (P) partiu de uma simplificação da lei do gás ideal, assumindo a temperatura de 20 °C para atmosfera padrão:

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot Z}{293} \right)^{5,26}$$

Sendo: P – pressão atmosférica (kPa); Z – altitude (m).

O cálculo da pressão de vapor (e_s) foi realizado utilizando-se a seguinte equação:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2}$$

Sendo: e_s – pressão de saturação do vapor (kPa); $e^o(T_{max})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima diária do ar (kPa); $e^o(T_{min})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima diária do ar (kPa).

A pressão de saturação do vapor a uma temperatura “ T ” do ar [$e^o(T)$] foi obtida por meio da seguinte equação:

$$e^o(T) = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27T}{T+237,3}\right)$$

Sendo: $e^o(T)$ – pressão de saturação do vapor a uma temperatura “ T ” do ar (kPa); T – temperatura do ar (°C); $\exp(\dots)$ – base do logaritmo neperiano (2,7183) elevada a potência (adimensional).

A declinação da curva de pressão de saturação do vapor (Δ) foi obtida por meio da seguinte relação:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e^o(T_{med})}{(T_{med} + 237,3)^2}$$

Sendo: Δ – declinação da curva de pressão de saturação do vapor (kPa °C⁻¹); $e^o(T_{med})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura média diária do ar (kPa); T_{med} – temperatura média diária do ar (°C).

A pressão atual do vapor (e_a) foi determinada a partir de dados diários de umidade relativa média do ar:

$$e_a = \frac{UR_{med}}{100} \cdot \left[\frac{e^o(T_{máx}) + e^o(T_{mín})}{2} \right]$$

Sendo: e_a – pressão atual do vapor (kPa); UR_{med} – umidade relativa média diária do ar (adimensional); $e^o(T_{máx})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima diária do ar (kPa); $e^o(T_{mín})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima diária do ar (kPa).

Conhecendo-se o valor de e_a , foi possível obter a temperatura do ponto de orvalho (T_{dew}) por meio da inversão da equação de Tétens, isolando T_{dew} e com isso obtendo a seguinte equação:

$$T_{dew} = \frac{237,3 \cdot \ln e_a + 116,9889}{16,777 - \ln e_a}$$

Sendo: T_{dew} – temperatura do ponto de orvalho do ar (°C); e_a – pressão atual do vapor (kPa).

A radiação solar no topo da atmosfera (R_a) para períodos diários foi estimada por meio da seguinte equação:

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_s)]$$

Sendo: R_a – radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$); G_{sc} – constante solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$; $G_{sc} = 0,0820 \text{ m}^{-2} \text{min}^{-1}$); d_r – distância relativa Terra-Sol (adimensional); ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos); φ – latitude (radianos); δ – declinação solar (radianos).

A distância relativa Terra-Sol (d_r) e a declinação solar (δ) foram obtidas por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right)$$

Sendo: d_r – distância relativa Terra-Sol (adimensional); δ – declinação solar (radianos); J – dia juliano.

O ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (ω_s) foi obtido por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)]$$

Sendo: ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos); φ – latitude (radianos); δ – declinação solar (radianos).

A radiação solar incidente (R_s) foi medida na estação climatológica instalada na Fazenda Monte Alegre, pertencente à empresa Klabin Florestal, localizada na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná, com altitude média de 885 m, nas coordenadas 24°13' de latitude Sul e 50°32' de longitude Oeste.

A radiação solar em céu sem nuvens R_{so} ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), foi calculada com a expressão:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} Z) \cdot R_a$$

Sendo: R_{so} – radiação solar em céu sem nuvens ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); Z – altitude do local (m); R_a – radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

O saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}) foi calculado com a expressão:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s$$

Sendo: R_{ns} – saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); α – albedo ou coeficiente de reflexão da cultura hipotética (adimensional, $\alpha = 0,23$); R_s – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Assumindo que outros materiais como o CO_2 e a poeira, os quais absorvem e emitem ondas longas estão em concentração constante, a equação utilizada para aferir o saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}) foi a seguinte:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{(T_{max})^4 + (T_{min})^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

Sendo: R_{nl} – saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); σ – constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_{max} – temperatura máxima absoluta registrada no período de 24 horas (K); T_{min} – temperatura mínima absoluta registrada no período de 24 horas (K); e_a – pressão atual do vapor (kPa); R_s/R_{so} – radiação relativa de ondas curtas (limitada para $\leq 1,0$); R_s – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{so} – radiação solar em céu sem nuvens ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O saldo de radiação (R_n) foi obtido pela seguinte equação:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Sendo: R_n – saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{ns} – saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{nl} – saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

A FAO (Allen et al., 1998) considera o fluxo de calor no solo (G) igual a zero para períodos diários. No entanto, Pereira et al. (1997) afirmam que se a temperatura média dos três dias anteriores (T_{-3d}) estiver disponível, então é possível calcular G por meio da relação empírica:

$$G = 0,38 \cdot (T_d - T_{-3d})$$

Sendo: G – fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_d – temperatura média do dia ($^{\circ}\text{C}$); T_{-3d} – temperatura média dos três dias anteriores ($^{\circ}\text{C}$).

A partir da inserção das componentes no modelo de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) em uma planilha eletrônica, foi possível a obtenção da *ET_o* diária de Telêmaco Borba, para o período estudado.

LITERATURA CITADA

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56. Roma: FAO, p. 301. 1998.

PEREIRA, A.R.; VILA NOVA, N.A. & SEDYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: ESALQ, 1997.

APÊNDICE 5

Tabela A.5.1. Massa específica do solo (ρ), porosidade total (α), microporosidade, macroporosidade e condutividade hidráulica saturada do solo (K_0) cultivado com *Pinus taeda*, em Telêmaco Borba-PR.

Profundidade (m)	ρ (kg m ⁻³)	Macroporos ----- (m ³ m ⁻³)	Microporos (m ³ m ⁻³)	α -----	K_0 (mm dia ⁻¹)
0-0,1	1100 a	0,200 a	0,395 c	0,598 a	15607,34 a
0,1-0,2	1210 a	0,137 ab	0,403 bc	0,541 a	4097,95 b
0,2-0,4	1210 a	0,140 ab	0,395 c	0,537 a	5651,00 ab
0,4-0,6	1230 a	0,080 b	0,462 a	0,542 a	957,20 b
0,6-1,0	1160 a	0,116 ab	0,443 ab	0,561 a	904,80 b
CV (%) ⁽¹⁾	6,0	24,8	3,5	4,0	71,2

⁽¹⁾ Coeficiente de Variação.

* Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela A.5.2. Umidade volumétrica da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), obtidos do ajustamento da curva com os pontos de retenção de água no solo, amostrado na área cultivada com *Pinus taeda*, em Telêmaco Borba-PR.

Profundidade (m)	θ_{CC} --- (m ³ m ⁻³) ---	θ_{PMP} ---	α ⁽¹⁾ (hPa ⁻¹)	m ⁽¹⁾ ---(adimensional)---	n ⁽¹⁾ ---	θ_r ^(1,2) ----- (m ³ m ⁻³) -----	θ_s ^(1,3) -----
0-0,1	0,395	0,191	0,540	0,108	1,122	0,010	0,598
0,1-0,2	0,403	0,215	0,293	0,096	1,106	0,010	0,541
0,2-0,4	0,395	0,214	0,304	0,094	1,106	0,010	0,537
0,4-0,6	0,462	0,215	0,030	0,267	1,364	0,176	0,542
0,6-1,0	0,439	0,195	0,057	0,216	1,275	0,127	0,568

⁽¹⁾Parâmetros empíricos da equação de Van Genuchten (1980); ⁽²⁾Conteúdo residual de água do solo(m³ m⁻³); ⁽³⁾Conteúdo de água na condição de solo saturado (m³ m⁻³).

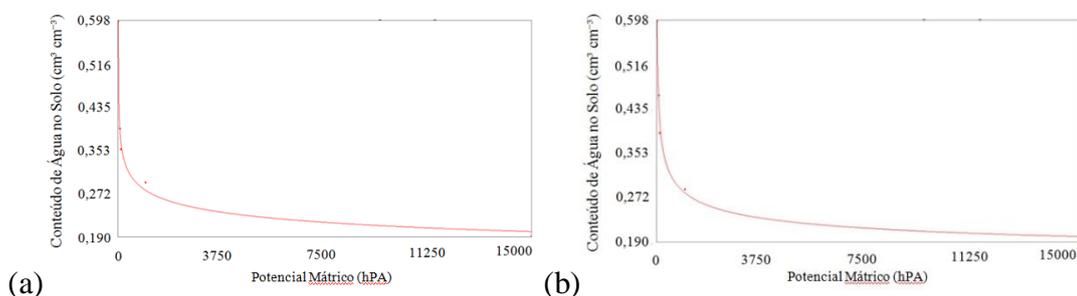


Figura A.5.1. – Curva de retenção da água no solo na área experimental contendo plantio de *Pinus taeda*, em Telêmaco Borba, Estado do Paraná: (a) cama de 0-0,1 m; (b) camada de 0,6-1,0 m.

APÊNDICE 6

Tabela A.6.1. Valores médios de coeficiente de cultivo (kc) para cultura do *Pinus taeda*, obtidos em um balanço hídrico do solo no ano de 2009, em Telêmaco Borba-PR, com periodicidade semanal (kc_m). (Pachechenik, 2010) ⁽¹⁾

Semana	Data	kc_m (adimensional)	Semana	Data	kc_m (adimensional)
1	—	—	27	09/07/2009	1,38
2	15/01/2009	0,42	28	16/07/2009	1,69
3	23/01/2009	3,18	29	23/07/2009	2,00
4	30/01/2009	0,35	30	29/07/2009	3,42
5	05/02/2009	1,45	31	06/08/2009	3,36
6	12/02/2009	0,91	32	12/08/2009	2,54
7	19/02/2009	1,83	33	19/08/2009	1,72
8	26/02/2009	1,39	34	26/08/2009	2,34
9	05/03/2009	0,96	35	02/09/2009	1,77
10	11/03/2009	0,84	36	09/09/2009	1,48
11	18/03/2009	1,01	37	16/09/2009	1,20
12	26/03/2009	0,47	38	23/09/2009	1,01
13	01/04/2009	0,29	39	30/09/2009	1,15
14	08/04/2009	1,28	40	08/10/2009	1,25
15	15/04/2009	1,25	41	14/10/2009	1,23
16	22/04/2009	0,76	42	21/10/2009	1,22
17	30/04/2009	0,27	43	28/10/2009	1,20
18	06/05/2009	0,41	44	04/11/2009	0,64
19	13/05/2009	0,48	45	11/11/2009	0,39
20	20/05/2009	0,54	46	19/11/2009	1,72
21	27/05/2009	0,57	47	26/11/2009	1,44
22	03/06/2009	2,19	48	03/12/2009	1,34
23	11/06/2009	2,13	49	09/12/2009	0,45
24	17/06/2009	2,07	50	16/12/2009	0,77
25	25/06/2009	3,32	51	23/12/2009	1,08
26	01/07/2009	1,43	52	30/12/2009	1,83

⁽¹⁾ Pachechenik (2010) não determinou os valores de kc , mas autorizou e disponibilizou dados experimentais que permitiram calcular os valores em um balanço hídrico do solo considerando os fluxos verticais.

Tabela A.6.2. Valores de coeficiente de cultivo (kc) para cultura do *Pinus taeda*, obtidos em um balanço hídrico do solo no ano de 2009, em Telêmaco Borba-PR, com periodicidade mensal ($kc_{mês}$). (Pachechenik, 2010) ⁽¹⁾

Mês	$kc_{mês}$ (adimensional)
Jan.	1,32
Fev.	1,31
Mar.	0,71
Abr.	0,89
Maio	0,84
Jun.	2,23
Jul.	2,12
Ago.	2,35
Set.	1,32
Out.	1,11
Nov.	1,11
Dez.	1,09

⁽¹⁾ Pachechenik (2010) não determinou os valores de kc , mas autorizou e disponibilizou dados experimentais que permitiram calcular os valores em um balanço hídrico do solo considerando os fluxos verticais.