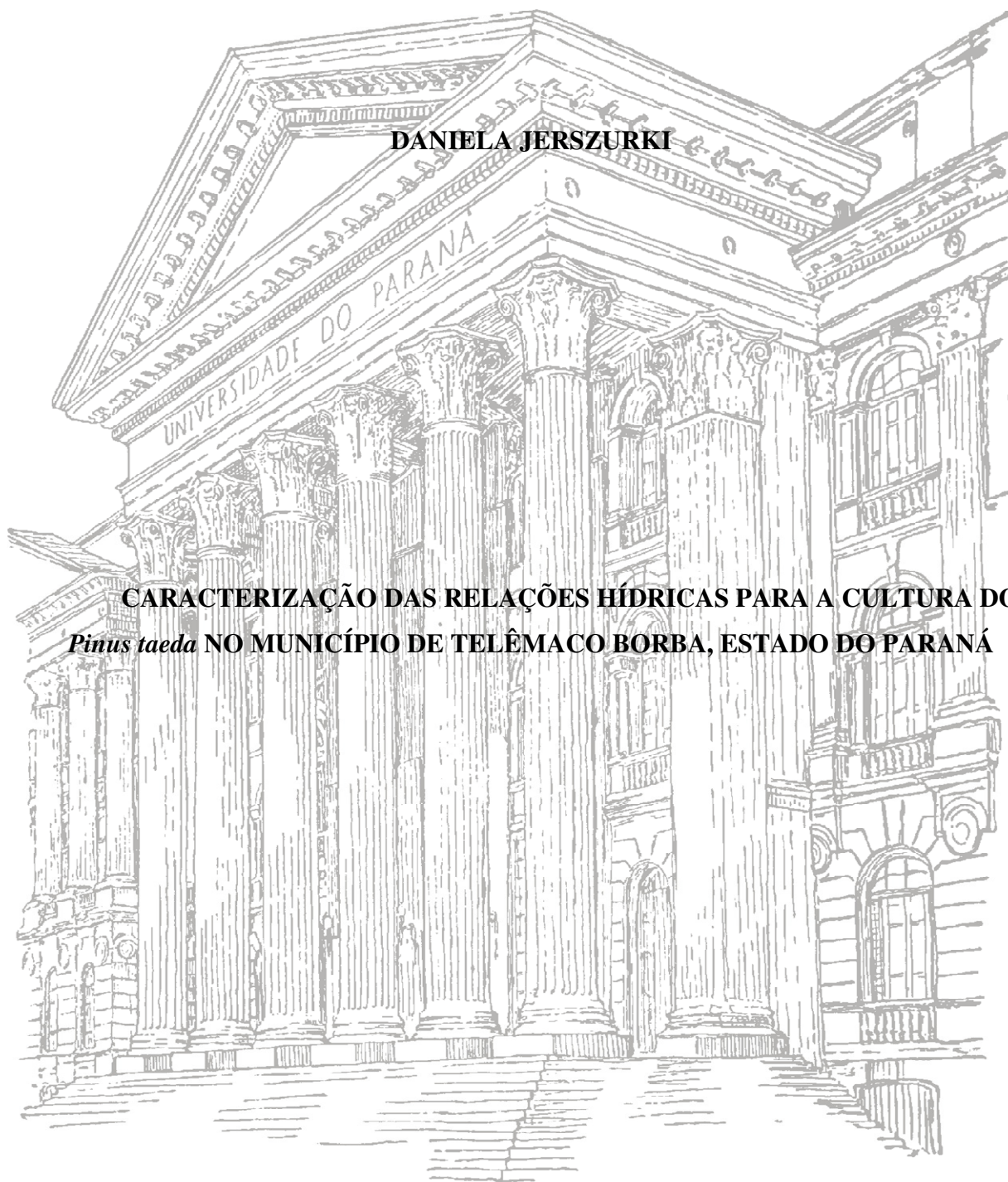


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**DANIELA JERSZURKI**

**CARACTERIZAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS PARA A CULTURA DO  
*Pinus taeda* NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ**



**CURITIBA**

**2013**

**DANIELA JERSZURKI**



**CARACTERIZAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS PARA A CULTURA DO  
*Pinus taeda* NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Qualidade e Sustentabilidade Ambiental, 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-orientador: Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista

**CURITIBA**

**2013**



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM CIÊNCIA DO SOLO

## PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **DANIELA JERSZURKI**, intitulada “**Caracterização das relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda* no Município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná**”, 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 da candidata, emitem parecer pela “**APROVAÇÃO**” da referida Dissertação. A candidata 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, 26 de fevereiro de 2013.

Prof.Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, Presidente, Orientador.

Prof. Dr. Irani dos Santos, I°. Examinador.

Prof. Dr. Robson André Armindo, II°. Examinador,

**DEDICATÓRIA**

*A Deus e aos meus pais, base de  
minha educação, sem Eles nada  
disso seria possível.*

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por ter me concedido sabedoria, disposição e saúde para que eu pudesse chegar até aqui.
- À minha família: meus pais Daniel Jerszurki e Iara Jerszurki, ao meu irmão Lucas Jerszurki e minha avó Ondina Mendonça pelo apoio, incentivo e, principalmente, por todas as orações que sempre me ajudaram 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, idéias, sugestões e críticas ao bom andamento deste trabalho.
- À Empresa Klabin Florestal e ao professor Paulo Eugênio Pachechenik pela disponibilização dos dados.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual não seria possível a conclusão de meu mestrado.
- Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por seus valiosos ensinamentos que nos inspiram e fazem sempre querer continuar e melhorar.
- Aos funcionários do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, pela presteza e amizade e aos meus colegas e amigos da turma de mestrado que colaboraram para a conclusão desse trabalho.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO GERAL</b>	
<b>GENERAL ABSTRACT</b> .....	viii
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	1
LITERATURA CITADA.....	2
<b>CAPÍTULO 1 – PARAMETRIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE HARGREAVES &amp; SAMANI E ANGSTRÖN-PRESCOTT PARA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ</b> .....	3
<b>RESUMO</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	5
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	6
2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	6
2.2 DADOS CLIMÁTICOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES.....	6
2.3 ESTIMATIVA DO COEFICIENTE $K_{rs}$ .....	7
2.4 ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES $a$ E $b$ .....	7
2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	7
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	8
3.1 ANÁLISE DO COEFICIENTE $K_{rs}$ .....	8
3.2 ANÁLISE DOS COEFICIENTES $a$ E $b$ .....	10
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	13
<b>5 LITERATURA CITADA</b> .....	13
<b>CAPÍTULO 2 – PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE E DECOMPOSIÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS PARA A REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ</b> .....	15
<b>RESUMO</b> .....	15
<b>ABSTRACT</b> .....	16
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	18
2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	18
2.2 DADOS CLIMÁTICOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES.....	19
2.3 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_o$ ).....	19
2.4 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E ESTIMATIVA DE SEUS VALORES PROVÁVEIS.....	20
2.5 DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	21
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	22
3.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PROVÁVEL.....	22
3.2 PRECIPITAÇÃO PROVÁVEL.....	24
3.3 DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA EM COR DA PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	27
3.4 DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	30
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	36
<b>5 LITERATURA CITADA</b> .....	36

<b>CAPÍTULO 3 – RELAÇÕES HÍDRICAS PARA A CULTURA DO <i>Pinus taeda</i> NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ.....</b>	<b>40</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>40</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>41</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	43
2.2 DADOS CLIMÁTICOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES.....	44
2.3 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_o$ ).....	44
2.4 MODELO DE BALANÇO HÍDRICO UTILIZADO NAS ANÁLISES.....	44
2.5 COEFICIENTE DE CULTIVO ( $K_c$ ) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA ( $ET_c$ ).....	45
2.6. CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL ( $CAD$ ) E ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO ( $AD$ ).....	45
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>4 CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>
<b>5 LITERATURA CITADA.....</b>	<b>53</b>
<b>CAPÍTULO 4 – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE E DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES DE DEFICIÊNCIA E EXCEDENTE HÍDRICOS PARA A REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ .....</b>	<b>56</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>56</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>57</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>59</b>
2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	59
2.2 DADOS CLIMÁTICOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES.....	60
2.3 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_o$ ).....	60
2.4 MODELO DE BALANÇO HÍDRICO UTILIZADO NAS ANÁLISES.....	61
2.5 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DE DEFICIÊNCIA E EXCEDENTE HÍDRICOS E ESTIMATIVA DE SEUS VALORES PROVÁVEIS.....	61
2.6 DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DEFICIÊNCIA E EXCEDENTE HÍDRICOS.....	62
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>63</b>
3.1 DEFICIÊNCIA E EXCEDENTE HÍDRICOS PROVÁVEIS.....	63
3.2 DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES DE DEFICIÊNCIA E EXCEDENTE HÍDRICOS.....	70
<b>4 CONCLUSÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>5 LITERATURA CITADA.....</b>	<b>73</b>
<b>CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>76</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICE 1.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE 2.....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE 3 .....</b>	<b>89</b>

# CARACTERIZAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS PARA A CULTURA DO *Pinus taeda* NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ<sup>1</sup>

Autor: Eng. Agr. Daniela Jerszurki

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista

## RESUMO GERAL

O município de Telêmaco Borba encontra-se na região central do Estado do Paraná, apresentando atividade florestal expressiva, com destaque para o *Pinus taeda*, espécie altamente influenciada pela disponibilidade de água no solo. Diante disso, teve-se por objetivo no presente trabalho o estudo das relações hídricas para a cultura do *Pinus* a partir da análise das componentes de um balanço hídrico agrícola (*BHA*) diário, o que possibilitou a determinação da ocorrência de períodos críticos de deficiência e excedente hídrico. As análises e resultados foram organizados e apresentados em quatro capítulos, sendo que no primeiro foram testadas as duas principais metodologias para a estimativa da radiação solar incidente (*Rs*), variável de entrada na estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith. No segundo capítulo foi realizada a caracterização das variáveis de entrada (precipitação - *P* e evapotranspiração de referência - *ET<sub>o</sub>*) do *BHA*, a partir da determinação das funções densidade de probabilidade (*fdp*) de melhor ajuste aos dados e dos movimentos das séries obtidos pela sua decomposição. No terceiro trabalho foram caracterizadas as relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda*, a partir de um *BHA* diário baseado na metodologia de Thornthwaite & Mather. No quarto trabalho foram caracterizadas as variáveis de saída do balanço hídrico (deficiência hídrica - *DEF* e excedente hídrico - *EXC*), a partir da determinação da *fdp* de melhor ajuste aos dados e dos movimentos das séries obtidas pela sua decomposição. As análises realizadas no primeiro trabalho permitiram verificar a maior associação entre *Rs* estimada e observada com valores de *K<sub>rs</sub>* anual e sazonal, sugerindo que os coeficientes encontrados podem ser utilizados para estimar valores de *Rs* na região. Para os demais trabalhos observou-se ajustamento dos valores decendiais de *ET<sub>o</sub>* à *fdp* Normal e, *P*, *DEF* e *EXC* à *fdp* Gama. Os valores de *P* decendial apresentaram-se superiores à *ET<sub>o</sub>*, favorecendo o armazenamento da água no solo e reduzindo a possibilidade de deficiência hídrica. Na decomposição das séries temporais pode-se observar que as séries de *P*, *ET<sub>o</sub>*, *DEF* e *EXC* não apresentaram tendência significativa de acréscimo ou decréscimo ao longo dos anos. Ainda, para a *P*, *DEF* e *EXC* houve pouca influência da sazonalidade enquanto que para a *ET<sub>o</sub>* os movimentos sazonais foram importantes. A ciclicidade e irregularidade exerceram grande influência sobre todas as componentes analisadas. Nesse contexto, o município de Telêmaco Borba mostrou-se promissor quanto ao cultivo do *Pinus*.

Palavras-chave: Contabilização hídrica. Espécies florestais. Função densidade de probabilidade. Modelos.



## CHARACTERIZATION OF WATER RELATIONS FOR THE CULTURE OF *Pinus taeda* IN TELÊMACO BORBA, PARANÁ STATE<sup>1</sup>

Author: Eng. Agr. Daniela Jerszurki

Advisor: Teach. Doc. Jorge Luiz Moretti de Souza

Co-advisor: Teach. Doc. Adão Wagner Pêgo Evangelista

### GENERAL ABSTRACT

In the central region of the Paraná state, forestry is significant, especially the *Pinus taeda* species strongly influenced by water availability in the soil. This study aimed to study the water relations for growing Pine from the analysis of the components of a daily agricultural water balance (*AWB*), which enabled the determination of critical periods of water surplus and deficit. In this paper the results are presented in four distinct chapters, with the first tested the two main methodologies for estimating solar radiation (*Rs*), input variable in the estimation of reference evapotranspiration by Penman-Monteith. In the second chapter was performed to characterize the input variables (precipitation - *P* and reference evapotranspiration - *ET<sub>o</sub>*) of a *AWB*, from the determination of the probability density functions (*pdf*) of the adjustment the best data and the movements of the series obtained by its decomposition. In the third study was characterized the water relations for growing *Pinus taeda*, from daily *AWB* based on the methodology of Thornthwaite & Mather. In the fourth study was characterized the output variables of the daily water balance (water deficit - *DEF* e surplus - *EXC*), from the determination of the *pdf* of best fit to the data and the movements of the series obtained by its decomposition. The analyzes carried out on the first work evidenced the greatest association between *Rs* and estimated values observed with seasonal and annual *K<sub>rs</sub>*, suggesting that the coefficients found can be used to estimate values of *Rs* in this region. For the other work were observed large amounts decennial adjustment of *ET<sub>o</sub>* to Normal *pdf* and *P*, *DEF* and *EXC* to Gamma. The values presented decennial *ET<sub>o</sub>* is greater than *P*, favoring the water storage in soil and reducing the possibility of water deficit. In the decomposition of the time series can be observed that the series of *P*, *ET<sub>o</sub>*, *DEF* and *EXC* showed no significant trend of increase or decrease over the years. Further, for *P*, *DEF* and *EXC* there was little influence of seasonal whereas *ET<sub>o</sub>* for seasonal movements are important. The cyclicity and irregularity exerted great influence on all components analyzed. In this context, the Telêmaco Borba showed promising for the *Pinus* cultivation.

Key-words: Water accounting. Forest species. Probability density function. Models.

## INTRODUÇÃO GERAL

O município de Telêmaco Borba apresenta grande importância econômica no Estado do Paraná devido ao crescimento da silvicultura, sendo que cerca de 60% das florestas plantadas são do gênero pinus, com predomínio da espécie *Pinus taeda* (Rosa et al., 2006). Segundo Doldan (1990) a disponibilidade de água no solo é um dos fatores físicos que mais influencia o cultivo do pinus. A ocorrência de déficit hídrico é uma das principais causas de perdas de produtividade para a cultura, devido à redução da taxa fotossintética (Vose & Swank, 1994), redução do aporte de nutrientes às árvores, diminuição na velocidade de mineralização da matéria orgânica e, em níveis extremos de déficit hídrico, o colapso do citoplasma das células (Sands & Mulligans, 1990). Nesse contexto, o estudo das relações hídricas para a cultura do pinus é útil e possibilita definir as variações de armazenamento de água no solo ao longo do tempo, fazer inferências a respeito da transpiração das plantas, determinar as regiões nas quais o sistema radicular é mais efetivo, dentre outros efeitos da vegetação sobre a água no solo (Leite et al., 1999).

O balanço hídrico é uma das melhores maneiras de se monitorar a variação do armazenamento de água no solo (*ARM*), evapotranspiração real (*ER*), deficiência hídrica (*DEF*) e excedente hídrico (*EXC*). No estudo das condições hídricas para as atividades agrícolas, as componentes podem ser medidas diretamente no campo (Reichardt & Timm, 2004; Libardi, 2005) ou estimadas a partir de dados climáticos por meio da utilização de modelos específicos (Souza & Gomes, 2007).

O conhecimento da tendência e distribuição das variáveis de entrada e saída de um balanço hídrico é importante para o entendimento e determinação de períodos críticos, sendo relevante no planejamento e manejo racional da produção agrícola para a condição de deficiência ou excedente hídrico (Ávila et al., 2009).

Teve-se como objetivo no presente trabalho estudar as relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda* no município de Telêmaco Borba, a partir da caracterização dos padrões de movimento e grandeza das componentes de um *BHA* diário, para determinar as variações de armazenamento de água no solo ao longo do tempo, bem como a ocorrência de períodos críticos de deficiência e excedente hídricos.

As análises e resultados obtidos no presente trabalho foram organizados e apresentados em quatro capítulos, quais sejam:

Capítulo 1 – Parametrização das equações de Hargreaves & Samani e Angström-Prescott para estimativa da radiação solar na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná;

Capítulo 2 – Precipitação e evapotranspiração de referência: distribuição de probabilidade e decomposição de séries temporais para a região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná;

Capítulo 3 – Relações hídricas para cultura do *Pinus taeda* na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná;

Capítulo 4 – Funções densidade de probabilidade e decomposição das séries de deficiência e excedente hídricos para a região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

## LITERATURA CITADA

ÁVILA, L.F.; MELLO, C.R. & VIOLA, M.R. Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 13:906–915, 2009.

DOLDAN, M.E.Q. Desenvolvimento da altura dominante de *Pinus taeda* L. como resposta aos estímulos dos fatores do meio, na região de Ponta Grossa. Revista Floresta, 20:54–55, 1990.

LEITE, F.P.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SANS, L.M.A. & FABRES, A.S. Relações hídricas em povoamento de eucalipto com diferentes densidades populacionais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 23:9–16, 1999.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Acadêmica, 2005.

ROSA, H.; MARTINS, S.S. & SILVA, O.H. Atividade florestal nos municípios de Telêmaco Borba, Ortigueira, Reserva, Imbaú e Tibagi: caracterização e perspectivas do setor. Acta Scientiarum Agronomy, 28:41–45, 2006.

SANDS, R. & MULLIGAN, D.R. Water and Nutrient Dynamics and Tree Growth. Forest Ecology and Management, 30:91–111, 1990.

SOUZA, J.L.M. & GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decedial em função da capacidade de água disponível no solo. Acta Scientiarum Agronomy, 30:153–163, 2007.

VOSE, J. M. & SWANK, W.T. Effect of long-term drought on the hydrology and growth of a white pine plantation in the southern Appalachians. Forest Ecology and Management, 64:25–39, 1994.

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

# **CAPÍTULO 1 – PARAMETRIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE HARGREAVES & SAMANI E ANGSTRÖN-PRESCOTT PARA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ**

## **RESUMO**

A estimativa da radiação solar incidente ( $R_s$ ) por equações matemáticas é útil quando não se dispõe de estações meteorológicas que a registrem. No presente trabalho teve-se como objetivo estimar, para os períodos anual, sazonal e mensal, o coeficiente empírico  $K_{rs}$  da equação de Hargreaves & Samani e os coeficientes  $a$  e  $b$  da equação de Angström-Prescott para estimar a  $R_s$ , confrontando valores estimados com valores observados para o município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Utilizou-se dados históricos diários (janeiro de 1981 a janeiro de 2011) de temperatura máxima, mínima e média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação solar global acumulada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), insolação diária ( $\text{h dia}^{-1}$ ) e radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $R_a$ ), calculada com metodologia recomendada pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO. Ocorreu maior associação entre  $R_s$  estimada e observada com valores de  $K_{rs}$  anual e sazonal. Os coeficientes  $a$  e  $b$  apresentaram índices “ $c$ ” “ótimo” (“ $c$ ”  $> 0,85$ ) para estimar  $R_s$  nos períodos analisados. Os resultados sugerem que os coeficientes encontrados podem ser utilizados para estimar valores de  $R_s$  na região.

Palavras-chave: Coeficiente empírico. Estimativa. Radiação solar.

# CHAPTER 1 – PARAMETERIZATION OF EQUATIONS HARGREAVES & SAMANI AND ANGSTROM-PRESCOTT TO ESTIMATE OF SOLAR RADIATION IN THE TELEMACO BORBA, PARANA STATE

## ABSTRACT

The estimation of incident solar radiation ( $R_s$ ) by mathematical equations is useful when there are no weather stations that record. The objective of this study was to estimate, for the annual, seasonal and monthly periods, the empirical coefficient  $K_{rs}$  of Hargreaves & Samani equation and  $a$  and  $b$  coefficients of Angstrom-Prescott equation for estimating  $R_s$ , comparing estimated values with observed values for Telemaco Borba, Parana. Were used historical data daily (January 1981 to January 2011) maximum, minimum and average air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), cumulative global solar radiation ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ), daily insolation ( $\text{h day}^{-1}$ ) and incident solar radiation at the top of the atmosphere ( $R_a$ ), calculated using a methodology recommended by the *Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO*. There is greater association between estimated and observed  $R_s$  with values of annual and seasonal  $K_{rs}$ . The coefficients  $a$  and  $b$  show indices " $c$ " "great" (" $c$ " > 0.85) to estimate  $R_s$  in the periods analyzed. The results suggest that the coefficients found are used to estimate values of the region.

Key-words: Empirical coefficient. Estimate. Solar radiation.

## 1 INTRODUÇÃO

A radiação solar tem grande influência sobre os processos atmosféricos e terrestres, alterando a temperatura e a circulação atmosférica (Souza et al., 2008). Segundo Cargnelutti Filho et al. (2007) sua medida em um determinado local e período do ano é imprescindível para estudos ambientais, possibilitando a modelagem meteorológica e climática. Além disso, é utilizada em estudos de necessidade hídrica de culturas irrigadas, modelagem de crescimento, mudanças climáticas, dentre outras (Borges et al., 2010). Apesar disso, existem poucas estações meteorológicas que registram a radiação solar, fazendo com que a disponibilidade de dados medidos seja reduzida (Weiss et al., 2001).

No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) dispõe de 321 estações meteorológicas convencionais. Dessas, 232 medem a insolação e somente 58 (18,1%) a radiação solar incidente ( $R_s$ ), por meio de actinógrafos (Lima, 2005). Além da falta de estações que estimem esses parâmetros, as que existem estão centralizadas nas regiões mais desenvolvidas do país, enquanto há grandes áreas agrícolas que não dispõem de dados climáticos completos.

Na tentativa de eliminar o problema, vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para a estimativa da  $R_s$ . No entanto, frequentemente necessitam de dados climáticos que nem sempre estão disponíveis nas estações meteorológicas, que medem principalmente temperatura e precipitação, e necessitam de calibração quando utilizados em condições diferentes das que foram desenvolvidos (Borges et al., 2010). Dentre os diversos modelos matemáticos que estimam a radiação solar incidente ( $R_s$ ) destaca-se a equação desenvolvida por Hargreaves & Samani (1982), baseada na amplitude térmica diária, radiação solar no topo da atmosfera ( $R_a$ ) e um coeficiente de ajuste ( $K_{rs}$ ). Na equação, a amplitude térmica diária pode ser usada como um indicador da fração da  $R_a$  que chega à superfície do solo, ou seja, a  $R_s$ . Para localidades do interior, onde dominam as grandes extensões de terra e as massas de ar não são fortemente influenciadas por um grande corpo de água, o valor do  $K_{rs}$  recomendado é de 0,16. No entanto, para localidades costeiras onde as massas de ar estão influenciadas por uma massa de água nas proximidades, o  $K_{rs}$  recomendado é de 0,19 (Allen et al., 1998). No entanto, o  $K_{rs}$  pode ser melhor estimado para as condições de uma determinada localidade, refletindo melhores estimativas da  $R_s$ .

Outra equação, amplamente utilizada, é a de Angström-Prescott (Prescott, 1940) que estima a  $R_s$  a partir de medidas do número efetivo de horas de brilho solar. Angström (1924)

apresentou uma equação em que o quociente entre  $R_s$  e  $R_a$  foi linearmente correlacionado com o quociente do número de horas de brilho solar ( $n$ ) pela insolação máxima possível ( $N$ ). Prescott (1940) simplificou a equação para que os coeficientes linear ( $a$ ) e angular ( $b$ ) pudessem ser obtidos a partir de ajustes estatísticos, sendo que o método foi denominado de Angström- Prescott. A equação de Angström- Prescott pode ser utilizada tanto para estimar a  $R_s$ , quanto para obter  $n$  em estações automáticas que normalmente não medem esse valor. A *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (Allen et al., 1998) apresenta os valores dos coeficientes  $a$  (0,25) e  $b$  (0,50) considerados padrão, no entanto, estes coeficientes podem ser estimados regionalmente, refletindo-se em valores mais confiáveis de  $R_s$ .

No presente trabalho teve-se como objetivo estimar o coeficiente empírico  $K_{rs}$  da equação de Hargreaves & Samani, bem como os coeficientes  $a$  e  $b$  da equação de Angström- Prescott para estimar a  $R_s$ , confrontando os valores estimados com os valores observados para o município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Local de realização do trabalho**

As análises do presente trabalho foram realizadas para o município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. A região está localizada no Segundo Planalto Paranaense e, segundo a classificação de Köppen, apresenta clima tipo Cfa/Cfb, subtropical úmido transicional para temperado propriamente dito, com temperatura média no mês mais frio inferior a 16°C, com ocorrência de geadas e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes (IAPAR, 2000).

### **2.2 Dados climáticos utilizados nas análises**

Foram utilizados dados históricos diários de temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), radiação solar incidente acumulada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e insolação diária ( $\text{h dia}^{-1}$ ), de janeiro de 1981 a janeiro de 2011, provenientes de uma 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 incidente no topo da atmosfera ( $R_a$ ) foi calculada de acordo com a metodologia apresentada por Allen et al. (1998), a qual é baseada na latitude do local e no dia juliano.

### 2.3 Estimativa do coeficiente $Krs$

As estimativas do coeficiente  $Krs$  (adimensional) foram realizadas empregando-se a equação de Hargreaves & Samani (1982).

$$Rs = Krs \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot Ra$$

Sendo:  $Rs$  – radiação solar incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $Krs$  – coeficiente empírico ( $^{\circ}\text{C}^{-0,5}$ );  $T_{max}$  – temperatura máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{min}$  – temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $Ra$  – radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

### 2.4 Estimativa dos coeficientes $a$ e $b$

Para a estimativa dos coeficientes  $a$  e  $b$  foi utilizada a equação de Angström-PreScott (PreScott, 1940).

$$Rs = Ra \cdot \left( a + b \cdot \frac{n}{N} \right)$$

Sendo:  $Rs$  – radiação solar incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $Ra$  – radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $n$  – insolação diária ( $\text{h dia}^{-1}$ );  $N$  – duração máxima teórica do dia ( $\text{h dia}^{-1}$ );  $a$  – coeficiente linear;  $b$  – coeficiente angular.

Os coeficientes  $a$  e  $b$  da equação Angström-PreScott, para os períodos anual, sazonal e mensal, foram obtidos a partir de análise estatística de regressão linear, estimando  $Rs/Ra$  a partir de  $n/N$ .

### 2.5 Análise estatística dos resultados

Para verificar o ajuste entre os resultados de  $Rs$  observados e estimados, foram realizadas análises de regressão linear com a obtenção dos seus respectivos coeficientes ( $R$ ). Para avaliar o grau de concordância entre as estimativas e os valores observados de  $Rs$ , foi utilizado o índice “ $d$ ” de Willmott et al. (1985):

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

Sendo:  $d$  – índice de concordância de Willmott et al. (1985);  $Rs_i$  – radiação solar incidente estimada no  $i$ -ésimo dia ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $Rs_{oi}$  – radiação solar incidente observada no  $i$ -ésimo



dia ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $\bar{R}_{s_o}$  – média da radiação solar incidente observada no período considerado ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

Para comparação dos valores observados e estimados, foi utilizada uma adaptação do índice de desempenho “*c*” adotado 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 linear (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*” ≤ 0,40) (Camargo & Sentelhas, 1997).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise do coeficiente *Krs*

Observou-se que os valores do coeficiente empírico *Krs* ficaram entre 0,11 e 0,12 ao longo das estações e meses do ano (Tabela 1.1). Os resultados discordam do valor 0,16 recomendado por Allen et al. (1998) para regiões do interior. O índice “*d*” de Willmott et al. (1985), considerando a estimativa da *Rs* com o coeficiente *Krs*, ficou em 0,91 para o período anual, variando de 0,79 a 0,87 ao longo do ano.

Tabela 1.1. Coeficiente empírico  $Krs$  estimado para o período anual, sazonal e mensal, para uma série de 30 anos, na região de Telêmaco Borba – PR.

Período	Série (anos)	----- Valores de $Krs$ (adimensional) -----			CV* (%)
		Média	Maior	Menor	
Anual	31	0,12	0,13	0,10	3,60
Verão	31	0,12	0,17	0,10	8,46
Outono	31	0,12	0,14	0,08	8,64
Inverno	31	0,11	0,13	0,07	8,09
Primavera	31	0,11	0,16	0,10	8,55
Janeiro	31	0,12	0,18	0,10	12,89
Fevereiro	31	0,12	0,16	0,10	8,88
Março	31	0,12	0,13	0,10	6,18
Abril	31	0,12	0,14	0,09	7,76
Mai	31	0,12	0,15	0,07	13,06
Junho	31	0,11	0,13	0,06	11,68
Julho	30	0,12	0,14	0,07	10,71
Agosto	30	0,11	0,12	0,08	7,40
Setembro	30	0,11	0,14	0,09	8,88
Outubro	30	0,11	0,14	0,10	8,30
Novembro	30	0,12	0,18	0,10	11,53
Dezembro	30	0,12	0,21	0,10	15,01

\* Coeficiente de variação (CV) dos valores de  $Krs$

Comparando-se os valores observados e estimados de  $Rs$ , as análises indicaram índices de desempenho “c” “mediano” ( $0,60 < “c” \leq 0,65$ ) a “muito bom” ( $0,75 < “c” \leq 0,85$ ) para os períodos anual, sazonal e mensal. Pode-se inferir que houve maior associação entre a  $Rs$  estimada e observada quando utilizou-se valores de  $Krs$  anual e sazonal (Tabela 1.2). Os piores resultados ocorreram para o mês de fevereiro, provavelmente devido à dispersão que ocorre em períodos chuvosos, quando os valores de  $Rs$  medidos são menores que os calculados. Entretanto, a estimativa de  $Rs$  pode apresentar melhor desempenho quando são empregadas metodologias que utilizem dados de temperatura e precipitação pluvial (Podestá et al., 2004; Weiss & Hays, 2004).

Tabela 1.2. Coeficiente de correlação ( $R$ ), índice “ $d$ ” de Willmott et al. (1985) e índice “ $c$ ” de Camargo & Sentelhas (1997), obtidos nas análises contrastando os valores observados e estimados de  $R_s$ , para uma série de 30 anos, na região de Telêmaco Borba – PR.

Período	Série (anos)	$R$ ----- (adimensional) -----	“ $d$ ” ----- (adimensional) -----	“ $c$ ” ----- (adimensional) -----
Anual	29	0,86	0,91	0,79
Verão	30	0,82	0,85	0,70
Outono	30	0,86	0,87	0,75
Inverno	29	0,82	0,87	0,72
Primavera	29	0,85	0,84	0,72
Janeiro	30	0,84	0,82	0,69
Fevereiro	30	0,78	0,79	0,62
Março	30	0,82	0,82	0,68
Abril	30	0,82	0,83	0,69
Maior	30	0,83	0,83	0,69
Junho	30	0,82	0,83	0,69
Julho	29	0,79	0,81	0,64
Agosto	29	0,77	0,80	0,64
Setembro	29	0,79	0,79	0,65
Outubro	29	0,86	0,82	0,70
Novembro	29	0,85	0,83	0,71
Dezembro	29	0,84	0,84	0,71

### 3.2 Análise dos coeficientes $a$ e $b$

As análises estatísticas evidenciaram que, em média, o parâmetro “ $a$ ” foi igual a 0,19 para o período anual, apresentando variações ao longo das estações e meses do ano (Tabela 1.3). Os maiores valores de “ $a$ ” para os períodos verão e outono evidenciaram que a transmissividade da atmosfera é maior nos meses de inverno e primavera, devido à menor quantidade de poeira no ar e à freqüente entrada de ar polar que apresentam menor turbulência em relação às massas tropicais (Blanco & Sentelhas, 2002). Os maiores valores de  $b$  ocorreram no inverno e os menores no verão (Tabela 1.3), devido também ao efeito da transmissividade atmosférica. Blanco & Sentelhas (2002) estimando os coeficientes  $a$  e  $b$  da equação de Angström-PreScott para o município de Piracicaba – SP, em um período de quatro anos (junho de 1996 a maio de 2000), utilizando dados de radiação solar e brilho solar, na escala anual, mensal e sazonal, encontraram valores anuais para  $a = 0,23$  e  $b = 0,50$ , semelhantes ao encontrado no presente trabalho para o coeficiente  $a$ , que variou de 0,17 a 0,23. No entanto, diferiram do encontrado para o coeficiente  $b$  que variou de 0,35 a 0,45. Em

estudo semelhante, considerando uma série de um ano (setembro de 1966 a agosto de 1967), Ometto (1968) encontrou valores para  $a$  e  $b$  iguais a 0,26 e 0,51, respectivamente.

Tabela 1.3. Parâmetros estatísticos dos coeficientes linear ( $a$ ) e angular ( $b$ ), obtidos nas análises de regressão linear, considerando os períodos anual, sazonal e mensal, para uma série de 30 anos, na região de Telêmaco Borba – PR.

Período	Série (anos)	----- Parâmetro $a$ -----				----- Parâmetro $b$ -----			
		Média	Menor	Maior	CV*	Média	Menor	Maior	CV*
Anual	28	0,19	0,17	0,23	7,45	0,41	0,36	0,45	5,89
Verão	29	0,22	0,18	0,27	8,76	0,36	0,3	0,41	6,86
Outono	29	0,19	0,14	0,24	12,06	0,41	0,35	0,48	8,35
Inverno	28	0,17	0,13	0,22	13,55	0,43	0,37	0,52	8,31
Primavera	28	0,19	0,16	0,27	12,41	0,41	0,26	0,51	10,57
Janeiro	29	0,21	0,16	0,28	13,56	0,37	0,3	0,44	9,64
Fevereiro	29	0,23	0,18	0,29	10,18	0,35	0,25	0,42	11,59
Março	29	0,21	0,15	0,25	12,27	0,37	0,29	0,45	10,37
Abril	29	0,19	0,13	0,25	15,81	0,39	0,27	0,46	11,94
Maio	29	0,18	0,12	0,28	19,19	0,43	0,34	0,51	10,94
Junho	29	0,19	0,13	0,27	18,83	0,42	0,31	0,52	11,58
Julho	28	0,17	0,13	0,26	15,98	0,44	0,33	0,53	11,54
Agosto	28	0,17	0,11	0,27	20,45	0,43	0,28	0,53	10,73
Setembro	28	0,17	0,11	0,22	17,27	0,45	0,36	0,56	10,03
Outubro	28	0,17	0,11	0,23	16,57	0,45	0,37	0,55	9,47
Novembro	28	0,22	0,17	0,39	23,41	0,37	0,05	0,45	25,39
Dezembro	28	0,21	0,17	0,26	10,32	0,37	0,27	0,45	12,08

\* Coeficiente de variação (CV) dos valores dos parâmetros  $a$  e  $b$ .

O valor médio anual do coeficiente  $a$  determinado no presente trabalho foi 11% menor ao encontrado por Ometto (1968), enquanto que o valor médio do coeficiente  $b$  foi 18% e 20% menor do que o apresentado, respectivamente, por Blanco & Sentelhas (2002) e Ometto (1968). Os valores de  $a$  e  $b$  obtidos para Telêmaco Borba são menores, e os resultados podem estar relacionados ao maior período de anos (30 anos) utilizados, na diferença entre os sensores que medem a  $R_s$  (Almeida & Landsberg, 2003) bem como, pelos procedimentos utilizados no processamento dos dados (Kusmierk-Tomaszewska et al., 2012). Os resultados obtidos evidenciam as considerações de Cargnelutti et al. (2007) quando afirmam que há uma relação entre o tamanho da amostra utilizada (número de anos) com os coeficientes  $a$  e  $b$  e, conseqüentemente, com a  $R_s$ .

Considerando os valores de  $R$  (Tabela 1.4), pode-se inferir que existe grande associação entre a  $R_s$  estimada com os coeficientes  $a$  e  $b$  (Tabela 1.3) e a  $R_s$  observada para o período estudado. O índice “ $d$ ” de Willmott et al. (1985) considerando a estimativa da  $R_s$  com os coeficientes  $a$  e  $b$  ficou em 0,95 para o período anual, variando de 0,92 a 0,95 ao longo do ano. Comparando-se os valores observados e estimados da  $R_s$ , as análises evidenciaram índices de desempenho “ $c$ ” “ótimos” (“ $c$ ” > 0,85) para os períodos anual, sazonal e mensal (Tabela 1.4), indicando precisão de estimativa dos valores de  $R_s$ . Aplicando-se os valores de  $a$  e  $b$ , obtidos nos períodos anual, sazonal e mensal na equação de Angström-PreScott para a estimativa de  $R_s$ , pode-se afirmar estatisticamente que não houve diferença entre valores estimados e observados (Dornelas et al., 2006), sugerindo que os coeficientes  $a$  e  $b$  podem ser utilizados na estimativa da  $R_s$ , para o município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

Tabela 1.4. Coeficiente de correlação ( $R$ ), índice “ $d$ ” de Willmott et al. (1985) e índice “ $c$ ” de Camargo & Sentelhas (1997), obtidos nas análises contrastando os valores observados e estimados de  $R_s$ , para uma série de 30 anos, na região de Telêmaco Borba – PR.

Período	Série (anos)	$R$ ----- (adimensional)	“ $d$ ” ----- (adimensional)	“ $c$ ” ----- (adimensional)
Anual	29	0,95	0,97	0,92
Verão	29	0,92	0,95	0,87
Outono	29	0,94	0,96	0,91
Inverno	29	0,95	0,97	0,91
Primavera	28	0,94	0,97	0,91
Janeiro	29	0,93	0,95	0,89
Fevereiro	29	0,92	0,93	0,86
Março	29	0,94	0,95	0,90
Abril	29	0,93	0,95	0,89
Mai	29	0,94	0,93	0,88
Junho	29	0,93	0,94	0,88
Julho	28	0,95	0,95	0,90
Agosto	28	0,95	0,95	0,90
Setembro	28	0,94	0,96	0,90
Outubro	28	0,95	0,96	0,92
Novembro	28	0,95	0,95	0,89
Dezembro	28	0,93	0,95	0,89

#### 4 CONCLUSÕES

- O valor médio de  $Krs$  está abaixo do valor proposto pela bibliografia, devido às diferenças entre os valores de radiação obtidos para as estações meteorológicas, bem como dos sensores que medem a  $Rs$  nessas estações meteorológicas.
- Ocorreu maior associação entre a  $Rs$  estimada e observada quando são utilizados valores de  $Krs$  anual e sazonal.
- Os coeficientes  $a$  e  $b$  apresentaram “ótimo” desempenho para estimar a  $Rs$  de todos os períodos analisados.
- Os coeficientes encontrados para as equações de Angström-Prescott e Hargreaves & Samani podem ser utilizados com confiança para estimar valores de  $Rs$  na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

#### 5 LITERATURA CITADA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 356p. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALMEIDA, A.C. & LANDSBERG, J.J. Evaluating methods of estimating global radiation and vapor pressure deficit using a dense network of automatic weather stations in coastal Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118:237–250, 2003.
- ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, London, 50:121–126, 1924.
- BLANCO, F.F. & SENTELHAS, P.C. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 10:295–300, 2002.
- BORGES, V.P.; OLIVEIRA, A.S.; COELHO FILHO, M.A.; SILVA, T.S.M. & PAMPONET, B.M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14:74–80, 2010.
- CAMARGO, A.P. & SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5:89–97, 1997.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; RADIN, B. & MALUF, J.R.T. Tamanho de amostra para a estimativa das médias decendiais de radiação solar global no estado do Rio Grande do Sul. *Ciência e Agrotecnologia*, 31:1402–1410, 2007.

DORNELAS, K.D.S.; SILVA, C.L. & OLIVEIRA, C.A.S. Coeficientes médios da equação de Angström-PreScott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41:1213–1219, 2006.

HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108:225–230, 1982.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Cartas Climáticas do Estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 2000. 1v. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em 03 de setembro de 2012.

KUSMIEREK-TOMASZEWSKA, R.; ZARSKI, J. & DUDEK, S. Meteorological automated weather station data application for plant water requirements estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 88:44–51, 2012.

LIMA, E.P. Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperaturas máxima e mínima de Minas Gerais, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 67p. (Dissertação de Mestrado)

OMETTO, A. Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1968. 64p. (Tese de Doutorado)

PODESTÁ, G.P.; NÚÑEZ, L.; VILLANUEVA, C.A. & SKANSI, M.A. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123:41–53, 2004.

PRESCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society Science Australian*, 64:14–118, 1940.

SOUZA, J.D.; CEBALLOS, J.C. & SILVA, B.B. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. *Revista Brasileira de Geofísica*, 2:1–36, 2008.

WEISS, A. & HAYS, C.J. Simulation of daily solar irradiance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123:187–199, 2004.

WEISS, A.; HAYS, C.J.; HU, Q. & EASTERLING, W.E. Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop simulations. *Agronomy Journal*, 93:1321–1326, 2001.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.M. & KLINK, D.R. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90:8995–9005, 1985.

## **CAPÍTULO 2 – PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE E DECOMPOSIÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS PARA A REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ**

### **RESUMO**

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os parâmetros estatísticos de cinco funções densidade de probabilidade (*fdp*) ajustadas aos valores decendiais observados de precipitação (*P*) e evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*), calcular seus valores prováveis à 75% de probabilidade com a *fdp* de melhor ajuste, bem como realizar a decomposição temporal das séries de *P* e *ET<sub>o</sub>*, observando as possíveis influências das oscilações das duas variáveis sobre o plantio de *Pinus taeda*, no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Para a verificação do ajustamento das *fdp* às séries de dados, agrupados em decêndios, foram aplicados testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% probabilidade. As séries temporais foram decompostas para obtenção dos padrões de tendência, ciclicidade, sazonalidade e irregularidade. Foram utilizados os métodos das médias móveis, mínimos quadrados, razão para a média móvel e remoção da componente tendência para obtenção da tendência, sazonalidade, irregularidade e ciclicidade, respectivamente. Aproximadamente 65% dos valores decendiais da *ET<sub>o</sub>* ajustaram-se à distribuição Normal e, para a *P*, 48% dos valores decendiais ajustaram-se à distribuição Gama. Os valores de *P* decendial foram superiores a *ET<sub>o</sub>*, favorecendo o armazenamento da água no solo e reduzindo a possibilidade de deficiência. As séries de *P* e *ET<sub>o</sub>* não apresentaram tendência significativa de acréscimo ou decréscimo ao longo dos anos para o município de Telêmaco Borba, mas foram influenciadas pelos movimentos sazonais, cíclicos e irregulares, sendo que os padrões de sazonalidade são diferentes para ambas. A sazonalidade teve pouca influência sobre a *P*, mas exerceu grande influência sobre a *ET<sub>o</sub>*.

**Palavras-chave:** Componentes hídricas. Relações hídricas. Tendência. Valores prováveis.



**CHAPTER 2 – PRECIPITATION AND REFERENCE CROP  
EVAPOTRANSPIRATION: PROBABILITY DISTRIBUTION AND BREAKDOWN  
OF TIME SERIES IN THE REGION OF TELÊMACO BORBA, PARANÁ STATE**

**ABSTRACT**

Had to aim in this work to determine the parameters of five statistical probability density functions (*pdf's*) adjusted decennial observed values of precipitation (*P*) and reference evapotranspiration (*ET<sub>o</sub>*), determining their probable values at 75% probability and perform the decomposition of these time series observing possible influence of these variables on the *Pinus taeda* plantation in Telêmaco Borba, Parana State. To check the adjustment of the data series to *pdf's* tests were applied Kolmogorov-Smirnov test at 5% probability. The time series were decomposed to obtain patterns of trend, cyclicity, seasonality and irregularity. Were used the methods of moving averages, least squares, reason for the removal and moving average trend component for obtaining the trend, seasonality, cyclicity and irregularity, respectively. Approximately 65% of the decennial *ET<sub>o</sub>* values were adjusted to normal distribution, and for *P*, 48% of the values were adjusted to the decennial Gamma distribution. *P* values were presented above decennial *ET<sub>o</sub>*, favoring the water storage in soil and reducing the possibility of failure. The series *P* and *ET<sub>o</sub>* showed no significant trend of increase or decrease over the years to Telemaco Borba, but were influenced by the seasonal, cyclical and irregular movements, and the seasonality patterns are different for both. Seasonality had little influence on *P*, but exercised great influence over the *ET<sub>o</sub>*.

Key-words: Water balance components. Water relations. Tendency. Probable values.

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo da tendência e distribuição da precipitação ( $P$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) em uma região é importante para o entendimento e determinação de períodos críticos, sendo relevante no planejamento e manejo racional da produção agrícola para a condição de deficiência ou excedente hídrico (Ribeiro et al., 2007; Ávila et al., 2009). Nesse contexto, o estudo da  $P$  e  $ET_o$  prováveis, conforme realizado por Bragança (2007), Jensen (1974) e Ávila et al. (2009) evidenciou a utilidade, aplicação e abrangência que o ajustamento e obtenção de parâmetros estatísticos referente às duas variáveis têm para a atividade agrícola como um todo, sendo que a estimativa dos valores prováveis é realizado após a identificação da distribuição de probabilidade de melhor ajuste à série histórica de dados.

Várias distribuições de probabilidade têm sido utilizadas para estudar a  $P$  e  $ET_o$ , apresentando variabilidade quanto à adequação às séries históricas (Ribeiro et al., 2007). Segundo Junqueira Júnior et al. (2007) as distribuições Gama e Log-Normal são as mais utilizadas para a estimativa da  $P$ . A distribuição Gama traz como vantagem a possibilidade de trabalhar com períodos mensais ou menores, como pântadas, decêndios e quinzenas (Assis et al., 1996). Para o ajuste da  $ET_o$  as distribuições Normal, Gama, Beta e Gumbel são as mais usadas (Pruitt et al., 1972).

Com a escolha da distribuição de probabilidade mais adequada, devem ser determinados os níveis de probabilidade a serem utilizados (Marques Júnior et al., 1995). Para que haja minimização dos riscos, não se deve trabalhar com probabilidades inferiores a 75% ou 80%, pois o nível de 75% representa a quantidade mínima de precipitação que se espera ocorrer em três de cada quatro anos. Jensen (1974) comenta que os níveis mais elevados de probabilidade (80% a 90%) são selecionados para culturas de grande valor econômico e condições reduzidas de água disponível no solo. Doorenbos & Pruitt (1977) consideram que na maioria das regiões irrigadas, os níveis de probabilidade ficam entre 75% e 80%. De acordo com Saad & Scaloppi (1988), nas condições de irrigação suplementar, dificilmente justifica-se, economicamente, adotar níveis superiores a 90%, sendo normalmente utilizados níveis que variam entre 50 a 75%.

Além do estudo da distribuição de probabilidade de melhor ajuste para  $P$  e  $ET_o$ , a análise das séries temporais dessas variáveis são de grande utilidade, principalmente quando se encontra algum tipo de tendência na decomposição das séries ao longo das estações e dos anos, obtendo-se padrões de movimento (Moraes et al., 2005). A identificação de padrões não

aleatórios nas séries temporais também permite a previsão e simulação de eventos futuros (Sansigolo, 2008). Assim, a decomposição de séries temporais é utilizada para a determinação dos movimentos de tendência, ciclicidade e sazonalidade dentro da série.

O município de Telêmaco Borba apresenta grande importância na região Centro-Sul do Paraná devido ao crescimento da silvicultura (Rosa et al., 2006). Dessa forma, pela análise dos movimentos das séries de  $P$  e  $ET_o$ , é possível analisar a evolução temporal dos dados e sua interferência sobre as culturas de interesse que, no caso de Telêmaco Borba é o pinus (*Pinus taeda*).

Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os parâmetros estatísticos de cinco funções densidade de probabilidade ( $f_{dp}$ ) ajustadas aos valores decendiais observados de  $P$  e  $ET_o$ , calcular seus valores prováveis à 75% de probabilidade, com a  $f_{dp}$  de melhor ajuste, bem como realizar a decomposição das séries de  $P$  e  $ET_o$ , observando-se as possíveis influências das oscilações destas variáveis sobre o plantio de *Pinus taeda* no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Local de realização do trabalho**

As análises do presente trabalho foram realizadas para o município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná (Figura 2.1). A região está localizada no Segundo Planalto Paranaense e, segundo a classificação de Köppen, apresenta clima tipo Cfa/Cfb, subtropical úmido transicional para temperado propriamente dito, com temperatura média no mês mais frio inferior a 16°C, com ocorrência de geadas e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes (IAPAR, 2000).

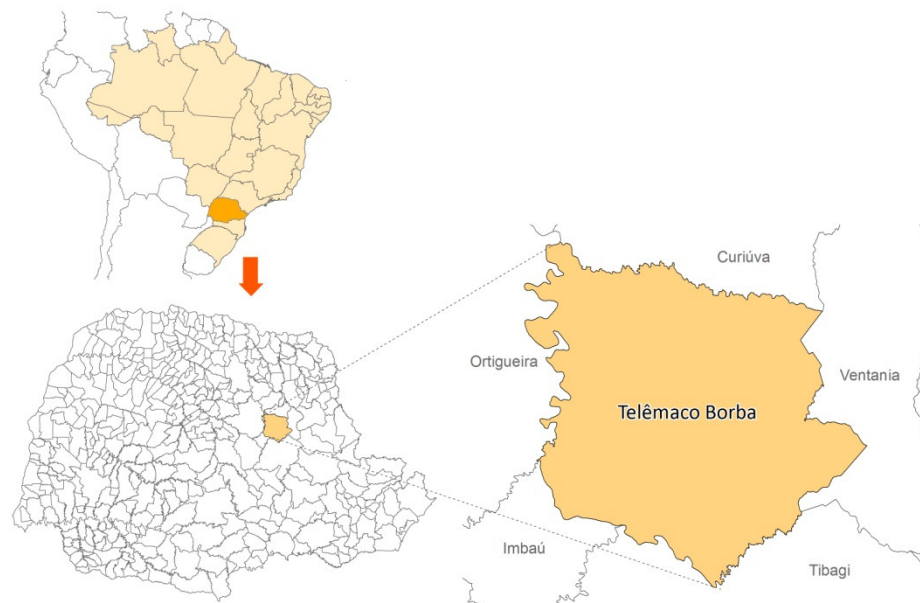


Figura 2.1 – Localização do município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná, onde se encontra a área de estudo.

## 2.2 Dados climáticos utilizados nas análises

Foram utilizados dados históricos diários (janeiro de 1981 a janeiro de 2011) provenientes de uma 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. Os dados necessários para o estudo foram: precipitação pluviométrica (mm), temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), umidade relativa média (%), radiação solar incidente acumulada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ) e velocidade do vento a dois metros de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ).

## 2.3 Estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ )

A estimativa da  $ET_o$  foi realizada com o método de Penman-Monteith, o qual é parametrizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (Allen et al., 1998) (Apêndice 1).

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

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

## 2.4 Organização dos dados de precipitação e evapotranspiração de referência e estimativa de seus valores prováveis

Considerando as recomendações de Assis (1996) e Frizzone et al. (1985), para o cálculo da  $P$  e  $ET_o$  decendial provável, os procedimentos necessários foram realizados com o auxílio de uma planilha eletrônica, contendo rotinas desenvolvidas especialmente para essa finalidade, quais sejam:

- Tabulação dos dados diários de  $P$  e  $ET_o$ , agrupamento dos dados em períodos de 10 dias (decêndios) e separação dos decêndios sem ocorrência de precipitação ( $P_o$ ) daqueles contendo precipitação diferente de zero. Para evitar inconsistências na estimativa dos parâmetros das  $fdp$ 's utilizadas, decêndios possuindo somatório de precipitação inferior ao valor um ( $1 \text{ mm decêndio}^{-1}$ ) foram considerados iguais a zero;
- Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados das séries decendiais de  $P$  e  $ET_o$ . Para auxiliar nas análises dos dados e identificar tendências, distribuições de frequência empregando cores foram realizadas, tendo como entrada dados diários de 31 anos de  $P$  e  $ET_o$ .
- Cálculo dos parâmetros estatísticos das cinco  $fdp$ 's testadas (Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme) (Apêndice 2), com as séries de valores observados de  $P$  e  $ET_o$  decendial. Os parâmetros encontrados foram: alfa e beta para a distribuição Gama; média e desvio padrão para a distribuição Normal; maior valor, menor valor e moda para a distribuição Triangular; média para a Exponencial; e, maior e menor valor para a distribuição Uniforme;
- Teste de aderência dos valores decendiais de  $P$  e  $ET_o$  estimados, com as cinco  $fdp$ 's, e observados, com o teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de probabilidade;
- Após a escolha da  $fdp$  que melhor se ajustou aos valores decendiais de  $P$  e  $ET_o$ , determinou-se a ocorrência de valores decendiais a 75% de probabilidade ( $P_{75\%}$  e  $ET_{75\%}$ ), para os 37 decêndios ao longo do ano. Para a precipitação ( $P$ ), encontrou-se um valor com

75% de probabilidade de ser igualado ou superado:  $P_{75\%} = P(P_{75\%} \in P \mid p_i \geq P_{75\%}) = 75\%$ . Para a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), encontrou-se um valor com 25% de probabilidade de ser igualado ou superado:  $ET_{o25\%} = P(ET_{o25\%} \in ET_o \mid eto_i \geq ET_{o25\%}) = 25\%$ ; encontrando valores com período de retorno ( $T$ ) igual 1,33 anos para a  $P$  e 4 anos para  $ET_o$ .

– Na estimativa da  $P_{75\%}$ , como algumas das  $fdp$ 's analisadas não admitem valores nulos, adotou-se a distribuição mista:

$$F(p) = P_o + (1 - P_o) \cdot D(p)$$

Sendo:  $F(p)$  – função cumulativa de probabilidade da distribuição mista (%);  $P_o$  – probabilidade de ocorrência de decêndios sem precipitação (%) - valores menores que  $1 \text{ mm} \cdot \text{decêndio}^{-1}$ ; e,  $D(p)$  – probabilidade estimada com a distribuição cumulativa teórica de melhor ajuste, em que seus parâmetros foram determinados na ausência de decêndios sem precipitação (%).

## 2.5 Decomposição das séries temporais de precipitação e evapotranspiração de referência

Para a obtenção da tendência foi utilizado o método das médias móveis, que considera como previsão para o período analisado a média das observações (Morettin, 1981). Para tanto, foram calculadas médias móveis de ordem 3, 5 e 7, bem como as médias móveis centradas de ordem 3 e ponderada de ordem 7, para obter maior alisamento das séries analisadas e melhorar a visualização da tendência. O método dos Mínimos Quadrados também foi utilizado para a obtenção da equação de regressão linear, e seu respectivo coeficiente de determinação.

Os movimentos sazonais, cíclicos e irregulares foram obtidos pelo modelo multiplicativo de decomposição de séries temporais.

$$Y = T \cdot C \cdot S \cdot I$$

Sendo:  $Y$  – valor original da série de  $P$  ou  $ET_o$  ( $\text{mm ano}^{-1}$ );  $T$  – componente tendência ( $\text{mm ano}^{-1}$ );  $C$  – componente cíclica (adimensional);  $S$  - componente sazonal (adimensional);  $I$  – componente irregular ou aleatória (adimensional).

A sazonalidade foi representada pelos índices sazonais ( $IS$ ) obtidos com o método da razão para a média móvel, também conhecido como método da média móvel percentual.

As variações irregulares e cíclicas, representadas pelos índices cíclicos e irregulares (*ICI*) foram avaliadas em conjunto e obtidas pela remoção da componente tendência.

$$CI = \frac{Y}{T}$$

Sendo: *CI* – componente cíclica e irregular (adimensional); *Y* – valor original da série (mm ano<sup>-1</sup>); *T* – componente tendência (mm ano<sup>-1</sup>).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Evapotranspiração de referência provável

Dentre as cinco *fdp* testadas, a distribuição normal ajustou-se a 65% dos valores decendiais de *ET<sub>o</sub>*, sendo a melhor distribuição avaliada (Tabela 2.1). Apenas 24% dos decêndios adequaram-se à distribuição Gama. Em trabalho semelhante, Marques Júnior et al. (1995) determinaram que os dados de *ET<sub>o</sub>* apresentaram alto grau de ajuste à distribuição Gama. Segundo Pruitt et al. (1972) a *ET<sub>o</sub>* tende a ajustar-se à distribuição Normal. Silva et al. (1998) determinaram, para o município de Cruz das Almas – BA, que as principais distribuições para a *ET<sub>o</sub>* foram a Normal, Log-Normal e Beta. Dessa forma, é possível notar variabilidade quanto à adequação das distribuições às séries históricas.

O valor médio da *ET<sub>o</sub>* foi 26,2 mm decêndio<sup>-1</sup> para a região de Telêmaco Borba, que possui clima Cfa/Cfb, segundo Koeppen. Para regiões de clima quente e úmido, a *ET<sub>o</sub>* decendial varia em torno de 70 mm decêndio<sup>-1</sup>. Segundo Silva et al. (1998) esse fato demonstra como a magnitude da *ET<sub>o</sub>* pode variar de um tipo climático para outro.

A evapotranspiração média decendial correspondeu, em média, a 90% da *ET<sub>o25%</sub>*. A probabilidade de ocorrência da evapotranspiração média foi próxima a 50%, variando de 47% a 55% (Figura 2.2). A pequena variação da *ET<sub>o</sub>* decendial média deveu-se ao melhor ajustamento da série à distribuição Normal.

Tabela 2.1. Parâmetros estatísticos de cinco *fdp*'s (N - Normal, T - Triangular, G - Gama, E - Exponencial e U - Uniforme) e valores prováveis decendiais da *ETo* ( $ETo_{25\%}$ ), para os 37 decêndios do ano, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

----- Série -----		----- Parâmetros das <i>fdp</i> 's -----							<i>fdp</i> **	<i>ETo</i> <sub>25%</sub> (mm decêndio <sup>-1</sup> )
Decêndios	Anos	Menor Valor	Maior Valor	$\mu^*$	$\sigma^*$	Moda	Alfa	Beta		
1 (01/01 a 10/01)	31	26,1	50,4	40,1	7,4	43,1	27,3	1,5	N	45,1
2 (11/01 a 20/01)	31	25,9	54,7	39,6	8,1	34,5	25,1	1,6	G	44,6
3 (21/01 a 30/01)	31	25,3	50,8	37,0	6,4	32,9	34,7	1,1	G	41,0
4 (31/02 a 09/02)	31	25,4	48,7	38,2	5,8	37,0	42,5	0,9	N	42,1
5 (10/02 a 19/02)	31	24,4	49,6	36,9	6,6	31,9	32,1	1,1	G	41,0
6 (20/02 a 01/03)	31	24,0	49,5	36,7	5,3	36,7	48,9	0,7	N	40,2
7 (02/03 a 11/03)	31	23,2	45,5	36,2	5,1	34,3	48,5	0,7	N	39,6
8 (12/03 a 21/03)	31	22,2	40,7	33,5	3,9	35,1	72,8	0,5	N	36,2
9 (22/03 a 31/03)	31	24,9	40,6	32,0	3,9	32,8	70,3	0,5	N	34,6
10 (01/04 a 10/04)	31	24,5	37,0	30,7	3,1	30,7	101,6	0,3	N	32,8
11 (11/04 a 20/04)	31	18,9	35,0	26,5	3,6	26,9	54,6	0,5	T	29,3
12 (21/04 a 30/04)	31	18,9	29,3	23,9	3,1	26,2	61,3	0,4	U	26,7
13 (01/05 a 10/05)	31	16,6	24,7	20,6	2,3	22,3	83,4	0,2	U	22,7
14 (11/05 a 20/05)	31	13,8	23,6	18,4	2,4	18,7	62,0	0,3	G	19,9
15 (21/05 a 30/05)	31	12,8	21,7	16,8	2,1	17,2	65,4	0,3	N	18,3
16 (31/05 a 09/06)	31	9,1	19,4	15,3	2,1	14,2	52,8	0,3	N	16,7
17 (10/06 a 19/06)	31	10,5	20,2	15,4	2,0	15,4	61,1	0,3	N	16,8
18 (20/06 a 29/06)	31	11,2	18,8	14,9	1,8	15,0	69,9	0,2	G	16,1
19 (30/06 a 09/07)	31	12,4	21,5	16,4	2,3	16,9	54,7	0,3	G	17,8
20 (10/07 a 19/07)	31	13,0	21,6	17,1	2,2	17,3	63,8	0,3	G	18,4
21 (20/07 a 29/07)	31	12,0	25,7	18,7	2,7	18,8	48,8	0,4	N	20,5
22 (30/07 a 08/08)	31	14,4	24,4	20,1	2,6	21,4	56,9	0,4	N	21,9
23 (09/08 a 18/08)	31	15,6	27,6	23,1	2,9	24,0	62,8	0,4	N	25,0
24 (19/08 a 28/08)	31	17,1	31,5	26,0	3,8	30,0	44,9	0,6	N	28,5
25 (29/08 a 07/09)	31	18,1	34,9	27,8	4,7	33,2	34,5	0,8	N	31,0
26 (08/09 a 17/09)	31	19,0	39,1	28,7	4,7	29,0	38,0	0,8	G	31,7
27 (18/09 a 27/09)	31	17,5	39,4	29,4	4,4	28,5	43,3	0,7	N	32,3
28 (28/09 a 07/10)	31	21,9	41,0	31,0	5,4	31,5	33,5	0,9	G	34,4
29 (08/10 a 17/10)	31	26,1	43,6	34,1	3,5	34,9	95,5	0,4	N	36,5
30 (18/10 a 27/10)	31	26,9	44,3	35,8	4,8	35,6	56,6	0,6	U	39,9
31 (28/10 a 06/11)	31	30,3	48,0	39,2	4,2	39,2	88,3	0,4	N	42,1
32 (07/11 a 16/11)	31	33,6	55,2	40,8	4,8	40,1	77,2	0,5	N	44,0
33 (17/11 a 26/11)	31	29,1	50,7	42,7	4,9	44,2	73,8	0,6	N	46,0
34 (27/11 a 06/12)	31	28,2	52,0	42,2	6,6	40,1	39,8	1,1	N	46,6
35 (07/12 a 16/12)	31	30,0	50,8	41,3	5,3	40,4	59,9	0,7	N	44,9
36 (17/12 a 26/12)	31	33,4	52,0	42,0	4,6	42,7	85,8	0,5	N	45,1
37 (27/12 a 31/12)	31	9,3	28,9	18,6	4,3	19,1	18,7	1,0	N	21,5

\* média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) dos valores decendias da série.

\*\* função densidade de probabilidade que melhor se ajustou aos dados decendiais da série.



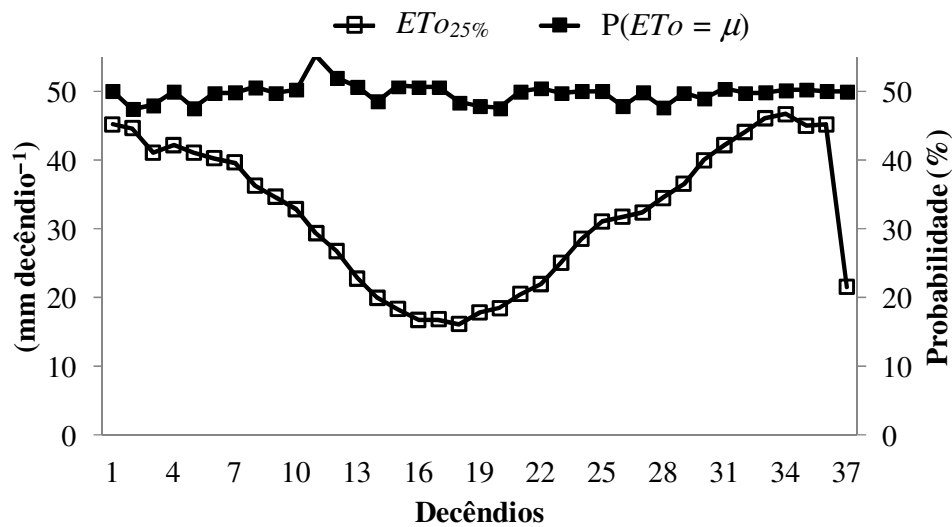


Figura 2.2 – Valores de  $ETo_{25\%}$ , em  $\text{mm decêndio}^{-1}$ , e  $P(ETo = \mu)$ , em porcentagem, para o município de Telêmaco Borba – PR, considerando a distribuição de probabilidade de melhor ajuste.

### 3.2 Precipitação provável

Dentre as *fdp*'s testadas, observou-se que 48% dos valores decendiais de precipitação tiveram melhor ajustamento com a distribuição Gama, concordando com os resultados obtidos por Soccol et al. (2010). Cerca de 35% dos decêndios adequaram-se à distribuição Exponencial. Sabe-se que a distribuição Exponencial é uma particularidade da distribuição Gama (Thom, 1958; Assis, 1996), o que justifica o melhor ajustamento das duas distribuições de probabilidade, com destaque para a distribuição Gama, para o município de Telêmaco Borba. O parâmetro  $\alpha$ , fator de forma da distribuição Gama, não excedeu a 100 em nenhum dos decêndios, indicando bom ajustamento à distribuição de probabilidade (Thom, 1958; Frizzone et al., 1985).

Segundo Araújo et al. (2001), em trabalho similar para o município de Boa Vista – RR, a distribuição Gama foi a que melhor se ajustou aos dados de precipitação na região. No entanto, Sampaio et al. (1999) encontraram que a distribuição Log-Normal foi a que mais se adequou aos dados de precipitação, principalmente em períodos chuvosos para a região de Lavras – MG. Também foi possível perceber variação dos parâmetros estimados para cada decêndio (Tabela 2.2), o que segundo Sampaio et al. (1999) deve-se, provavelmente, à aleatoriedade da  $P$ .

O valor médio de precipitação foi de  $14,7 \text{ mm decêndio}^{-1}$ , o qual segundo Junqueira Júnior et al. (2007) é considerado satisfatório, proporcionando menores problemas relacionados à seca para a cultura do Pinus na região (Booth & Jovanovic, 2000).

As maiores probabilidades de ausência de precipitação ocorreram entre os decêndios 19 e 27, concentraram-se no período de inverno (julho a setembro) (Figura 2.3).

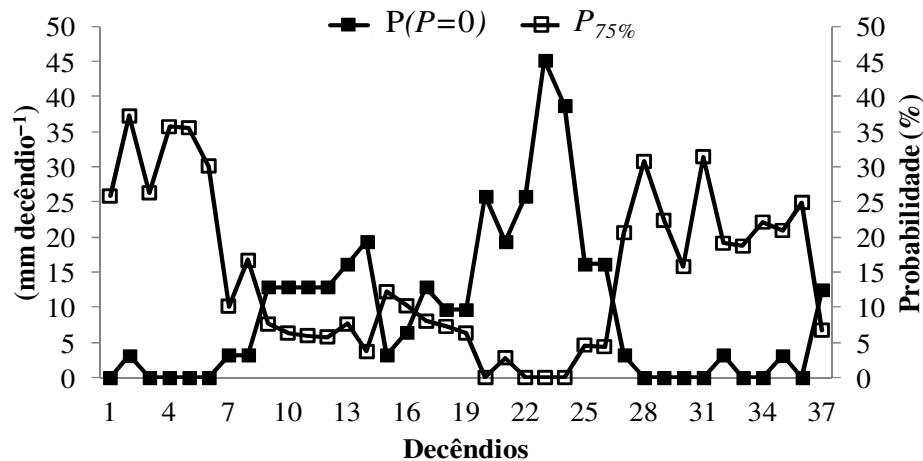


Figura 2.3 – Percentagem de decêndios com ausência de precipitação ( $P=0$ ) e  $P_{75\%}$  (mm decêndio<sup>-1</sup>), para uma série de 30 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

A precipitação provável correspondeu, em média, a 28,4% da precipitação média decenal, sendo que em termos absolutos a diferença representou  $32,4 \text{ mm decêndio}^{-1}$ . Assim, a utilização da precipitação média em projetos de irrigação em Telêmaco Borba não é adequada, pois não pode ser considerada representativa, podendo levar ao subdimensionamento de projetos (Frizzone et al., 1985). Oliveira & Carvalho (2003) também consideraram que a  $P$  média não é uma boa referência para estudos que utilizem estes valores como parâmetros de entrada.

A probabilidade de ocorrência de precipitação média variou de 20 a 50%. Os decêndios que apresentaram probabilidade de ocorrência da precipitação média próxima a 50% foram os que ajustaram a distribuição Normal. Assim, no período chuvoso a probabilidade variou de 30 a 50%, enquanto que no período seco a probabilidade esteve próxima de 20%. A variação nos resultados entre os períodos chuvoso e seco também foi observada por Ribeiro & Lunardi (1997).

Tabela 2.2. Parâmetros estatísticos de cinco *fdp*'s (N - Normal, T - Triangular, G - Gama, E - Exponencial e U - Uniforme) e valores prováveis decendiais da  $P$  ( $P_{75\%}$ ), para os 37 decêndios do ano, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

----- Série -----		----- Parâmetros das <i>fdp</i> 's -----								$P_o$ ***	$P(P_o = 0)$	$P_{75\%}$
Decêndios	Anos	Menor Valor	Maior Valor	$\mu^*$	$\sigma^*$	Moda	Alfa	Beta	<i>fdp</i> **	(decêndios)	(%)	(mm decêndio <sup>-1</sup> )
1 (01/01 a 10/01)	31	5,7	204,8	57,4	44,4	25,6	1,8	32,3	G	0	0,0	25,8
2 (11/01 a 20/01)	31	6,2	154,1	70,2	43,8	80,2	1,8	38,4	N	1	3,1	37,2
3 (21/01 a 30/01)	31	1,0	263,0	70,0	58,9	79,6	1,4	51,8	G	0	0,0	26,3
4 (31/02 a 09/02)	30	3,7	182,9	70,3	49,8	21,6	1,7	41,6	T	0	0,0	35,7
5 (10/02 a 19/02)	30	3,4	146,6	62,7	40,3	46,4	1,8	34,6	N	0	0,0	35,5
6 (20/02 a 01/03)	30	4,2	115,1	53,4	28,5	59,7	2,8	18,9	G	0	0,0	30,1
7 (02/03 a 11/03)	30	1,9	108,4	32,7	29,5	12,6	1,2	26,9	G	1	3,2	10,2
8 (12/03 a 21/03)	30	4,0	141,2	42,4	36,3	17,7	1,6	25,9	G	1	3,2	16,7
9 (22/03 a 31/03)	30	2,9	179,3	50,8	42,3	20,5	2,4	21,2	E	4	12,9	7,6
10 (01/04 a 10/04)	30	1,1	121,7	29,9	26,8	13,2	1,3	23,2	G	4	12,9	6,3
11 (11/04 a 20/04)	30	1,0	113,3	39,8	34,1	12,2	1,1	34,8	E	4	12,9	6,0
12 (21/04 a 30/04)	30	1,6	126,1	38,7	33,8	14,1	1,0	38,5	E	4	12,9	5,8
13 (01/05 a 10/05)	30	1,4	131,5	43,3	35,4	14,4	1,3	32,4	G	5	16,1	7,6
14 (11/05 a 20/05)	30	1,1	182,0	57,6	55,4	19,2	0,9	61,0	G	6	19,4	3,7
15 (21/05 a 30/05)	30	1,2	224,6	47,9	54,3	23,5	0,7	65,0	E	1	3,2	12,2
16 (31/05 a 09/06)	30	1,2	162,8	36,8	33,5	17,4	1,2	30,0	G	2	6,5	10,2
17 (10/06 a 19/06)	30	1,0	141,3	46,0	38,2	15,0	1,1	41,5	G	4	12,9	8,0
18 (20/06 a 29/06)	30	1,1	155,2	39,0	36,4	16,5	1,0	40,3	E	3	9,7	7,3
19 (30/06 a 09/07)	30	1,0	126,9	34,1	36,5	13,6	0,8	43,0	E	3	9,7	6,3
20 (10/07 a 19/07)	30	1,1	125,0	42,1	36,4	13,5	0,9	45,3	E	8	25,8	0,0
21 (20/07 a 29/07)	30	1,1	130,7	38,8	37,0	14,1	1,0	39,1	E	6	19,4	2,8
22 (30/07 a 08/08)	30	1,0	73,3	24,4	21,8	8,2	1,1	22,3	E	8	25,8	0,0
23 (09/08 a 18/08)	30	2,7	154,1	36,8	45,7	17,8	1,1	33,8	E	14	45,2	0,0
24 (19/08 a 28/08)	30	3,3	105,3	36,7	33,9	13,5	1,2	30,2	E	12	38,7	0,0
25 (29/08 a 07/09)	30	1,9	121,8	41,3	39,0	13,9	1,0	40,7	E	5	16,1	4,6
26 (08/09 a 17/09)	30	1,2	156,4	52,7	38,7	47,8	1,4	37,2	N	5	16,1	4,4
27 (18/09 a 27/09)	30	1,5	201,0	56,2	45,5	21,5	1,5	37,9	G	1	3,2	20,6
28 (28/09 a 07/10)	30	2,3	161,6	54,7	38,7	18,2	1,5	35,7	T	0	0,0	30,7
29 (08/10 a 17/10)	30	2,6	147,4	52,7	35,8	17,1	1,6	32,7	G	0	0,0	22,4
30 (18/10 a 27/10)	30	4,0	194,9	54,8	42,5	23,1	1,7	31,8	E	0	0,0	15,8
31 (28/10 a 06/11)	30	1,4	109,8	51,3	29,4	55,6	2,2	23,3	N	0	0,0	31,4
32 (07/11 a 16/11)	30	3,5	141,5	50,4	34,1	44,9	1,6	32,5	G	1	3,2	19,1
33 (17/11 a 26/11)	30	1,0	128,0	42,6	30,4	13,7	1,7	25,0	G	0	0,0	18,7
34 (27/11 a 06/12)	31	4,0	195,3	54,1	45,9	23,1	1,5	35,5	G	0	0,0	22,1
35 (07/12 a 16/12)	31	7,5	129,8	45,5	30,2	44,2	2,1	21,7	G	1	3,1	20,9
36 (17/12 a 26/12)	31	6,0	157,5	53,1	37,5	21,1	1,9	27,8	G	0	0,0	24,9
37 (27/12 a 31/12)	31	1,2	199,1	41,7	46,5	21,0	1,0	40,5	G	4	12,5	6,7

\* média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) dos valores decendias da série.

\*\* função densidade de probabilidade que melhor se ajustou aos dados decendiais da série.

\*\*\* decêndios contendo ausência de precipitação ( $P_o$ ).

Comparando valores de  $P$  e  $ET_o$  (Figura 2.4) verificou-se que a maior amplitude entre as médias das duas variáveis ocorreu entre os decêndios 14 (11/05 a 20/05) e 15 (21/05 a 30/05), sendo que a menor amplitude ocorreu para o decêndio 33. Assim, foi possível observar que na maioria dos decêndios do ano a  $ET_o$  média foi menor que a  $P$  média, o que tende a favorecer o armazenamento da água no solo e reduzir a possibilidade de deficiência.

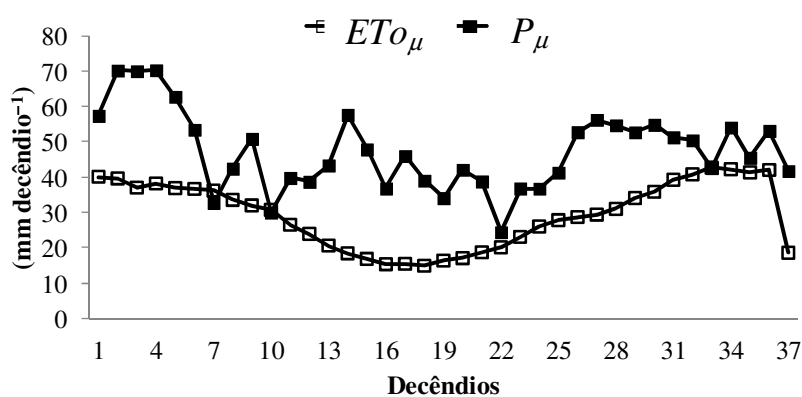
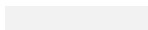
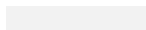
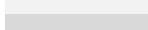
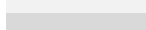


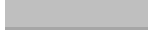















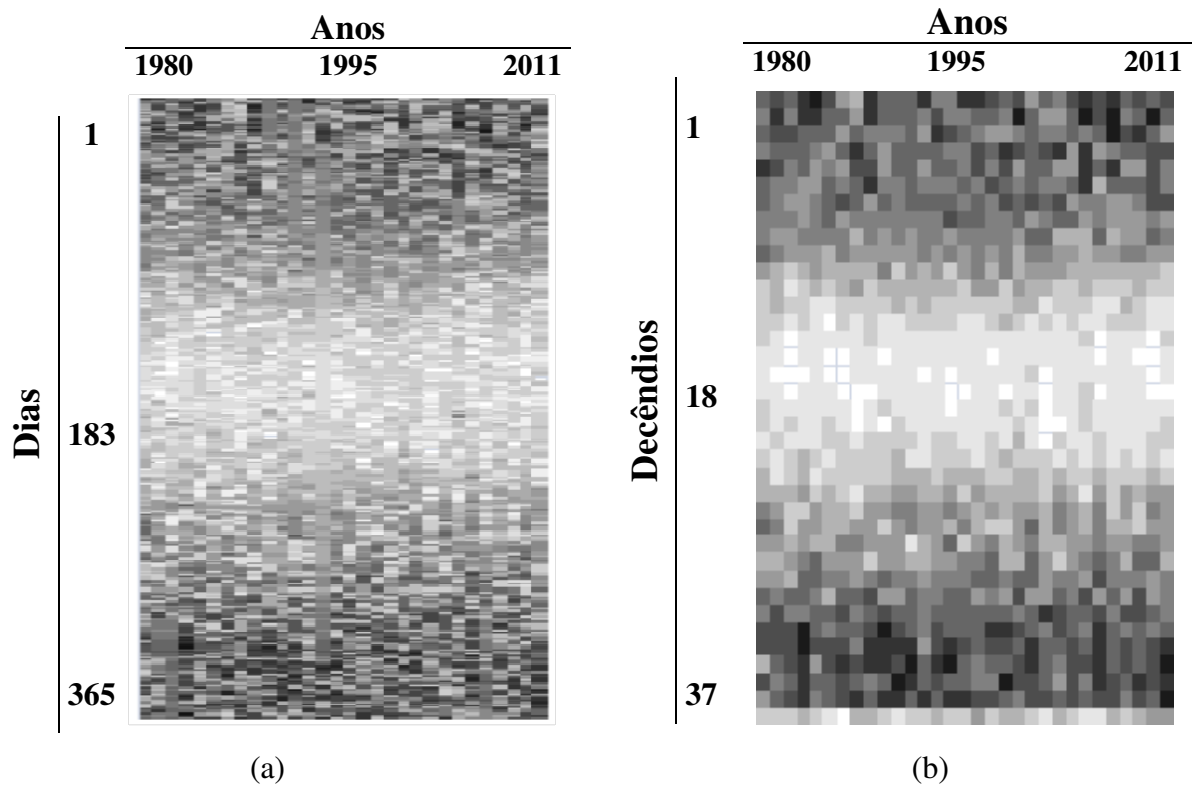
Figura 2.4 – Valores médios decendiais de  $P$  e  $ET_o$  para o município de Telêmaco Borba – PR.

### 3.3 Distribuição de frequência em cor da precipitação e evapotranspiração de referência

Encontra-se apresentada na Figura 2.5a a distribuição de frequência em cor da  $ET_o$ . Verificou-se que a  $ET_o$  segue um determinado padrão, melhor observado no período decendial (Figura 2.5b). Dessa forma, no período do inverno ocorreram os menores valores de  $ET_o$ , devido às baixas temperaturas observadas no período (Silva et al., 2011). Segundo Pereira et al. (2002) o efeito combinado da temperatura, velocidade do vento e umidade relativa definem a demanda atmosférica por vapor d'água e, conseqüentemente, a evapotranspiração.

Para a  $P$  (Figura 2.6), pôde-se observar que a distribuição de frequência não seguiu qualquer padrão, tanto para o período diário quanto para o período decendial, provavelmente devido à característica de aleatoriedade da variável (Sampaio et al., 2007; Calgaro et al., 2009).

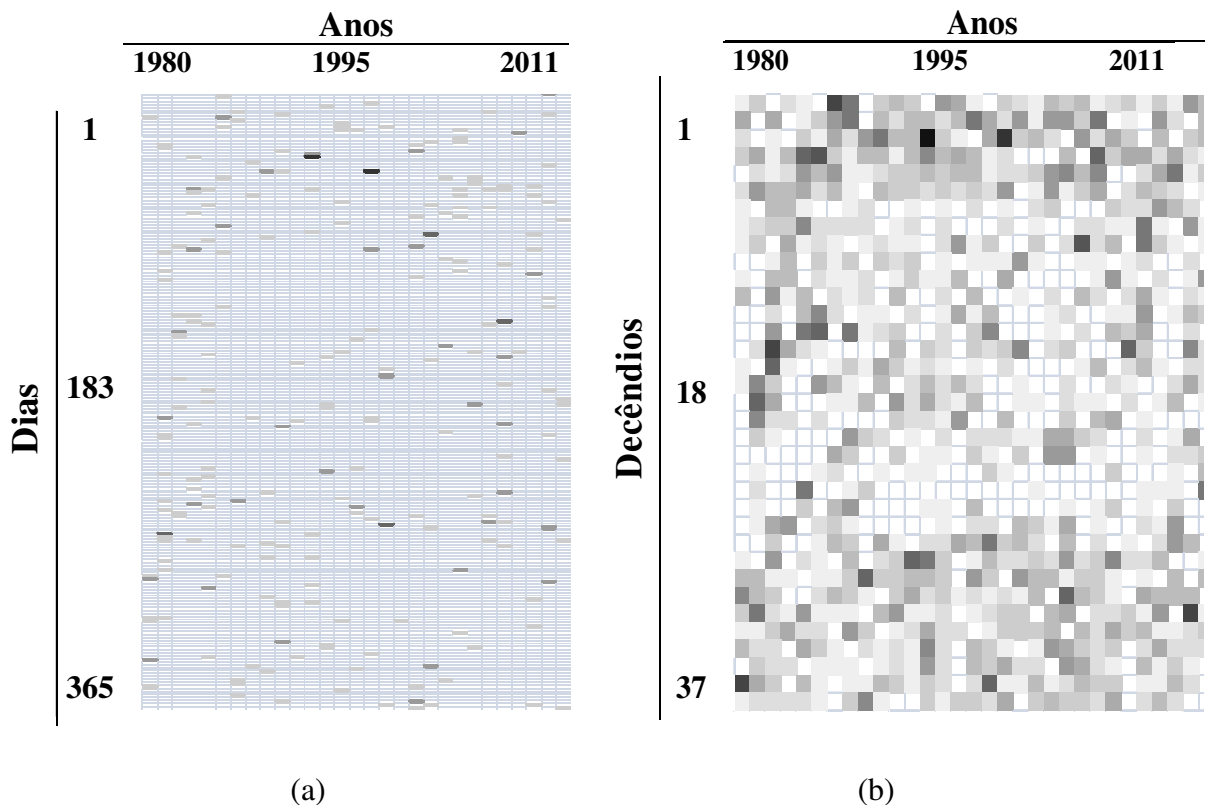
LIC (>)	LSC (<=)	Cor Classe	Frq. Obs.	LIC (>)	LSC (<=)	Cor Classe	Frq. Obs.
0,41	1,05		420	9,79	14,28		41
1,05	1,68		1235	14,28	18,77		186
1,69	2,32		2053	18,77	23,26		148
2,33	2,96		1718	23,26	27,74		118
2,96	3,60		1581	27,74	32,23		157
3,60	4,24		1324	32,23	36,72		163
4,24	4,88		973	36,72	41,21		172
4,88	5,52		671	41,21	45,69		94
5,52	6,16		227	45,69	50,18		53
6,16	6,80		18	50,18	54,67		15



Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe.

Figura 2.5 – Distribuição de frequência em cor da  $ET_0$ , para uma série de 30 anos, no município de Telêmaco Borba – PR: (a)  $ET_0$  para o período diário; e, (b)  $ET_0$  para período decenal.

LIC (>)	LSC (<=)	Cor Classe	Frq. Obs.	LIC (>)	LSC (<=)	Cor Classe	Frq. Obs.
0	10,12		9782	0	17,5		351
10,12	20,24		780	17,5	35,1		202
20,24	30,36		352	35,1	52,6		169
30,36	40,48		183	52,6	70,1		120
40,48	50,6		112	70,1	87,7		103
50,6	60,72		36	87,7	105,2		48
60,72	70,84		35	105,2	122,7		45
70,84	80,96		16	122,7	140,3		14
80,96	91,08		10	140,3	157,8		15
91,08	101,2		5	157,8	175,3		10
101,2	111,32		1	175,3	192,9		2
111,32	121,44		0	192,9	210,4		4
121,44	131,56		2	210,4	227,9		1
131,56	141,68		0	227,9	245,5		0
141,68	151,8		1	245,5	263,0		1



Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe.

Figura 2.6 – Distribuição de frequência em cor da  $P$ , para uma série de 30 anos, no município de Telêmaco Borba – PR: (a)  $P$  para o período diário; e, (b)  $P$  para período decenal.

### 3.4 Decomposição das séries de precipitação e evapotranspiração de referência

Analisando a série de precipitação obtida para o período de 30 anos não foi possível observar tendência significativa para os totais de chuva ( $R^2 = 0,0169$ ) (Figura 2.7). O ano mais chuvoso da série foi 1983 (2166,3 mm ano<sup>-1</sup>), enquanto que o menos chuvoso foi 1985 (1235,3 mm ano<sup>-1</sup>). O comportamento verificado foi o mesmo observado por Sansigolo (2008) para o Estado de São Paulo, o que provavelmente está relacionado à típica aleatoriedade dos dados de  $P$ . Os autores encontraram tendência de decréscimo nos valores anuais da  $P$ , porém, não significativa. Apesar disso, conforme relatado por Silva & Guetter (2003) para alguns municípios do Estado do Paraná, pôde-se verificar, nos últimos anos, o aumento da frequência de chuvas intensas e a ocorrência de secas de maior duração. Em trabalho semelhante, Bieras & Santos (2006) encontraram tendência decrescente da precipitação para a região de São Paulo, associada, provavelmente, às variações ou mudanças climáticas ocorridas nos últimos anos. Berlato et al. (2005) verificaram, para o Estado do Rio Grande do Sul, aumento significativo das precipitações nos últimos anos. Segundo os autores a maior concentração de eventos *El Niño*, especialmente entre 1980 e 1990, contribuiu para a tendência de aumento da precipitação pluvial do Estado. Paralelamente ao que foi constatado na Região Sul do país, alguns autores demonstram para Região Norte que as precipitações estão apresentando tendência de crescimento nos últimos anos (Rocha et al., 1989; Santos et al., 2009; Albuquerque et al., 2010). Dessa forma, percebeu-se que a tendência de crescimento ou decréscimo da  $P$  oscila entre as regiões brasileiras, o que segundo Tardy (1997) deve-se ao mecanismo de compensação, tomada em escala regional ou local, ou seja, as oscilações da pluviosidade são compensadas de uma região para outra.

Observou-se, no período analisado, um decréscimo de 8,61 mm mês<sup>-1</sup> para a precipitação. Em termos absolutos a precipitação caiu de 1665,4 mm ano<sup>-1</sup> para 1562 mm ano<sup>-1</sup>. O decréscimo anual da  $P$  não causa interferência sobre o cultivo de *Pinus taeda* na região de Telêmaco Borba, pois devido a sua grande plasticidade, a espécie é adaptada a regiões com precipitações anuais variando de 900 mm a 2200 mm e estações secas, com duração de até seis meses no ano (Booth & Jovanovic, 2000).

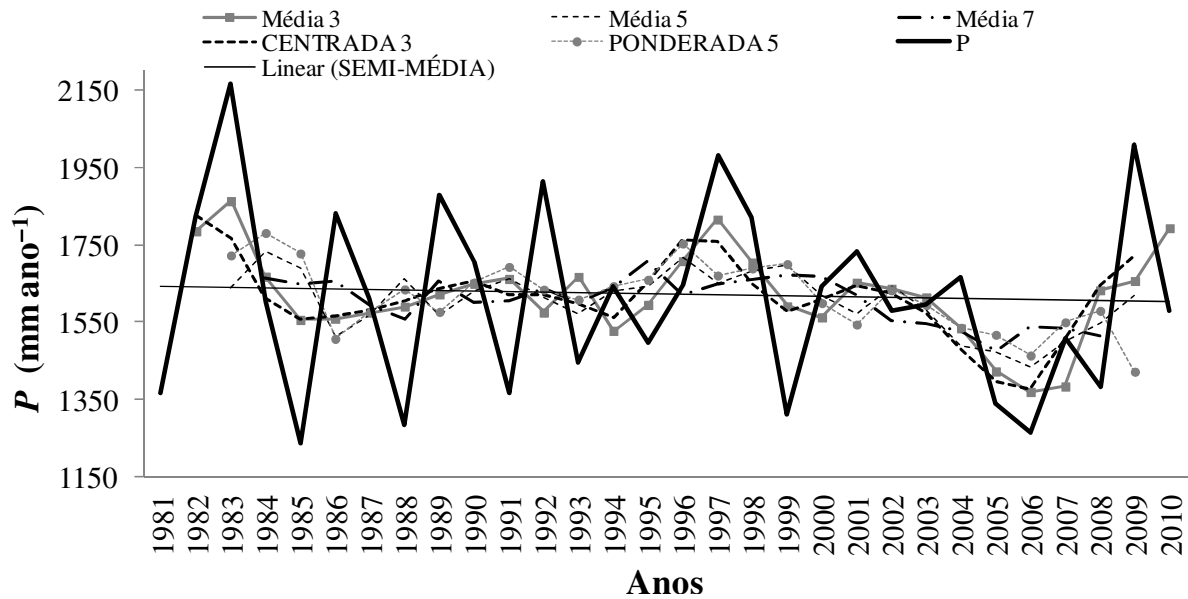


Figura 2.7 – Precipitação ( $P$ ) anual no município de Telêmaco Borba – PR: médias móveis de 3, 5 e 7 períodos, centrada de 3 períodos e ponderada de 5 períodos, para uma série de 30 anos.

Apesar de ter apresentado leve crescimento ao longo dos anos analisados, a  $ET_o$  também não apresentou tendência significativa para a região de Telêmaco Borba ( $R^2 = 0,0331$ ) (Figura 2.8). A  $ET_o$  é influenciada, principalmente, pela umidade relativa, temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento. Dessa forma, variações climáticas tendem a provocar impactos ainda maiores sobre a  $ET_o$ , o que explica a sua variação ao longo dos anos (Gong et al., 2006). Para Alencar et al. (2011) a redução da insolação e da velocidade do vento são os fatores que mais influenciaram a  $ET_o$  na região de Minas Gerais, apresentando tendência de crescimento no período de 1975 a 2003. Shimizu & Higa (1981) analisando as variáveis climáticas que influenciam a  $ET_o$ , verificaram que a temperatura média foi a variável que mais influenciou o crescimento e desenvolvimento do *Pinus taeda*.

O acréscimo nos valores de  $ET_o$  foi de  $0,77 \text{ mm ano}^{-1}$ , o que em termos absolutos significa um aumento de 24 mm para o período analisado. No entanto, pode-se afirmar que tal variação não interfere negativamente no cultivo de pinus no município, já que as áreas preferenciais para o cultivo são as de maior altitude, que normalmente apresentam menor  $ET_o$  anual (Higa et al., 2008).



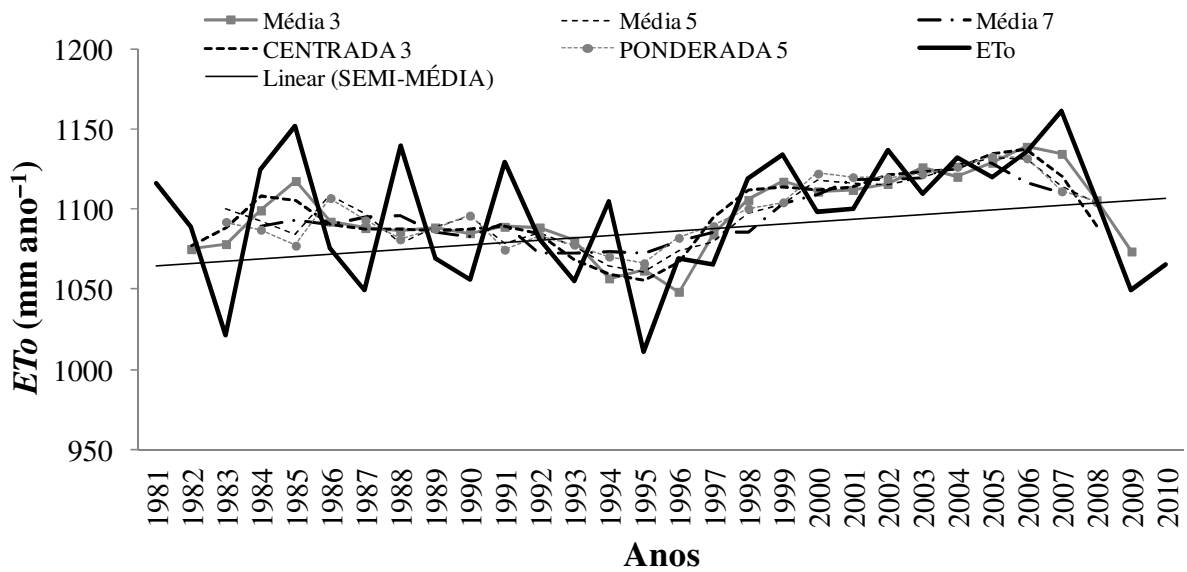


Figura 2.8 – Evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) anual no município de Telêmaco Borba – PR: médias móveis de 3, 5 e 7 períodos, centrada de 3 períodos e ponderada de 5 períodos, para uma série de 30 anos.

Com a remoção dos movimentos sazonais da série de dados (Figura 2.9) observou-se que a sazonalidade tem pouca influência sobre a  $P$  (Figura 2.10). Com relação à  $ET_o$  (Figura 2.11), os movimentos sazonais tiveram grande influência sobre a série analisada (Figura 2.12). A  $P$  foi pouco influenciada pela sazonalidade devido sua aleatoriedade, o que não ocorre com a  $ET_o$  que é influenciada pelos movimento de periodicidade anual, ou seja, pode-se afirmar que a  $ET_o$  foi fortemente influenciada pelas estações do ano.

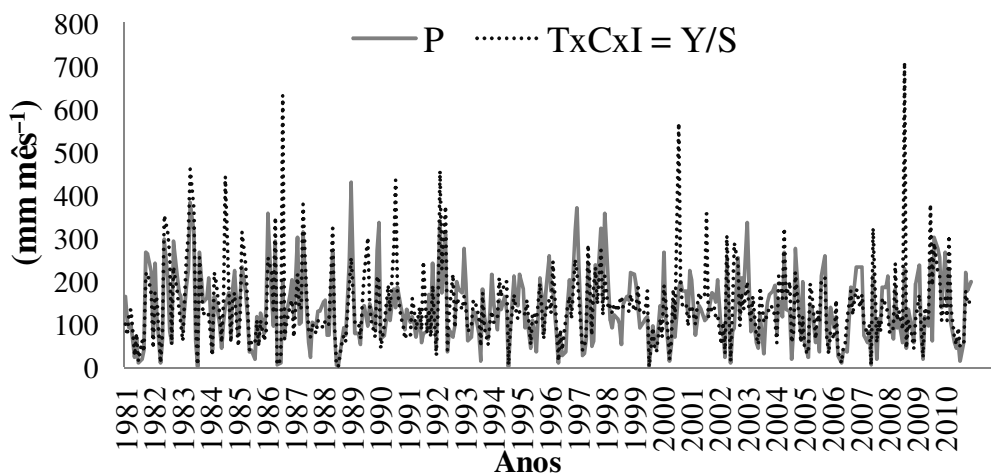


Figura 2.9 – Série de  $P$  removendo-se os movimentos sazonais, para uma série de 30 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

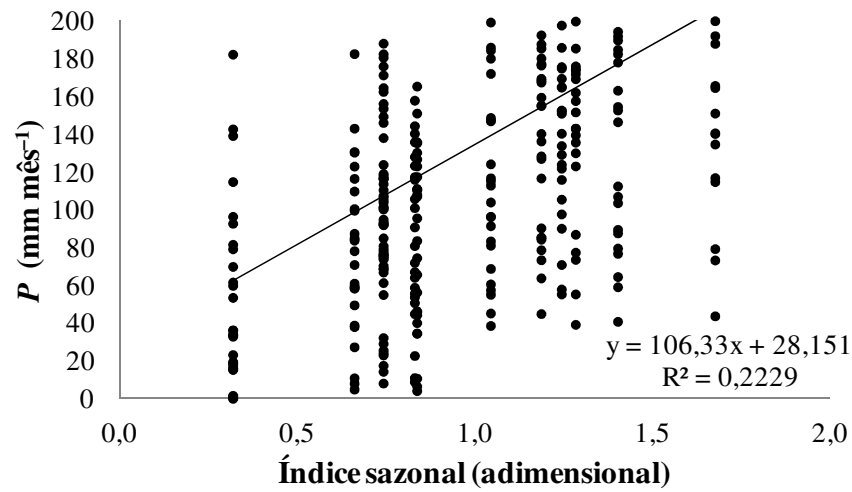


Figura 2.10 – Regressão linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtidos entre os valores mensais de  $P$  e índices sazonais, para uma série de 30 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

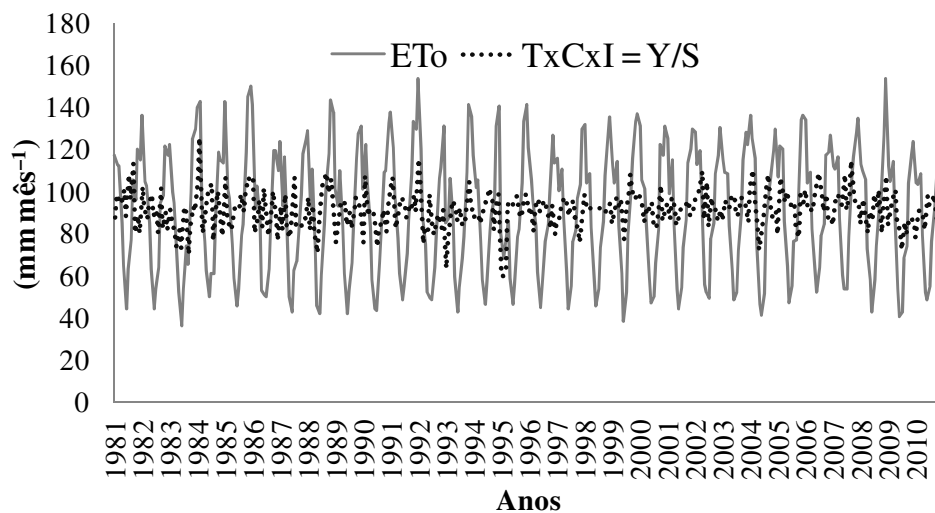


Figura 2.11 – Série de  $ET_0$  removendo-se os movimentos sazonais, para uma série de 30 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

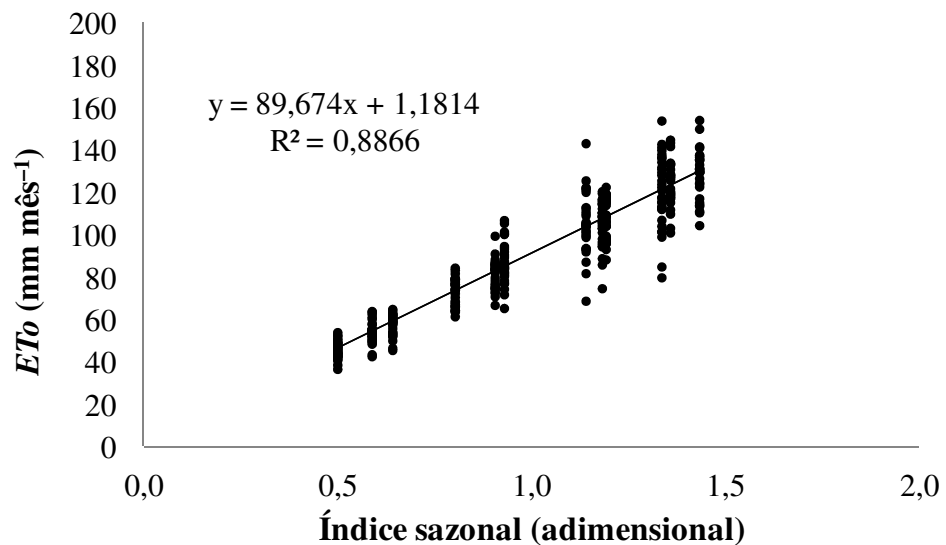


Figura 2.12 – Regressão linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtidos entre os valores mensais de  $ET_0$  e índices sazonais, para uma série de 30 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

Segundo Morettin (1981) as variações sazonais são as oscilações de curto prazo que ocorrem dentro do ano, repetindo-se sistematicamente ano após ano. Tais variações são representadas pelos índices sazonais ( $IS$ ), tanto para a  $P$  quanto para a  $ET_0$  (Figura 2.13).

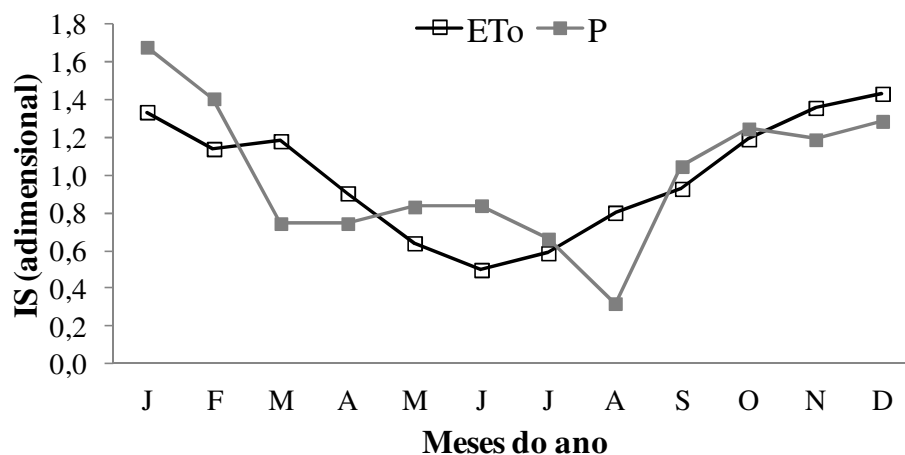


Figura 2.13 – Índices sazonais ( $IS$ ) da série de  $P$  e  $ET_0$ , para o período mensal, no município de Telêmaco Borba – PR.

Apesar da  $P$  ter apresentado maior aleatoriedade, os índices sazonais demonstraram que a sazonalidade ocorreu quando a  $P$  começou a decrescer (entre maio e julho), até atingir o valor mínimo em agosto, voltando a aumentar em setembro, com maior concentração entre os meses de dezembro a fevereiro (Figura 2.13). Os meses mais secos dos anos foram julho (92 mm mês<sup>-1</sup>) e agosto (61 mm mês<sup>-1</sup>). Conceição (2008) analisando uma série de 35 anos para

o município de Jales, Estado de São Paulo, também observou a concentração das chuvas no período de verão, mas com tendência de crescimento ao longo dos anos analisados.

A  $ET_o$  não apresentou o mesmo padrão de sazonalidade da  $P$ , pois enquanto nos meses mais secos (maio a agosto) a  $P$  tendeu ao decréscimo, a  $ET_o$  aumentou. Assim, o mês com menor taxa evapotranspirativa foi junho ( $45 \text{ mm mês}^{-1}$ ), seguindo de aumento nos meses de julho ( $54 \text{ mm mês}^{-1}$ ) e agosto ( $75 \text{ mm mês}^{-1}$ ). Com isso, a partir do início da estação seca a  $ET_o$  apresentou crescente acréscimo nos seus valores. Em trabalho semelhante Tomasella et al. (2007) observaram acréscimos para a  $ET_o$  na época mais seca do ano, com valores que chegavam a exceder a  $P$ , o que pode comprometer o armazenamento de água no solo com a ocorrência de deficiência hídrica.

Movimentos cíclicos foram observados nas séries de  $P$  e  $ET_o$  (Figuras 2.14). Com a remoção da tendência das séries de dados as curvas continuaram apresentando os mesmos movimentos da tendência, ou seja, as séries não foram influenciadas pela tendência, mas sim pela sazonalidade, ciclicidade e aleatoriedade. Dessa forma, com os índices cíclicos e irregulares ( $ICI$ ) se aproximando de 1, ocorreu menor influência desses movimentos sobre as séries de  $P$  e  $ET_o$  (Morettin, 1981).

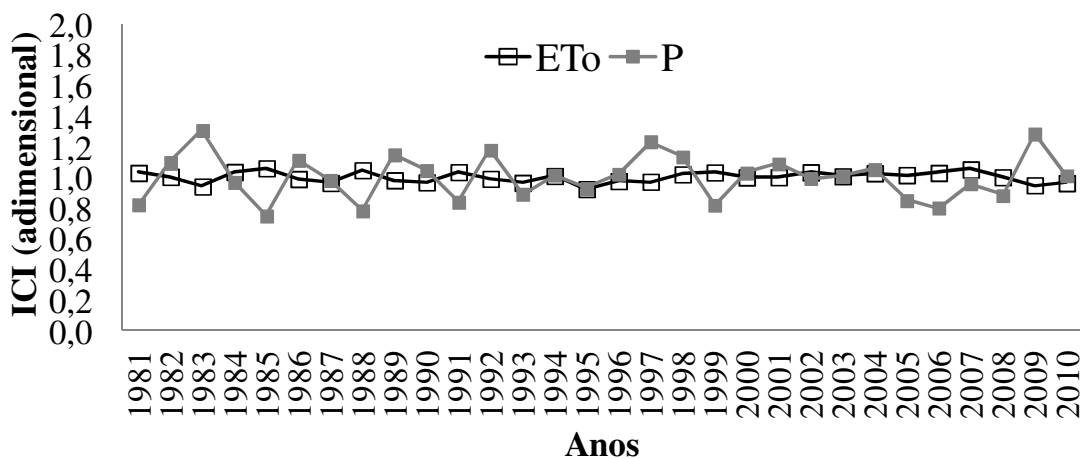


Figura 2.14 – Variações cíclicas e irregulares ( $ICI$ ), para a série de 30 anos de  $P$  e  $ET_o$ , no município de Telêmaco Borba – PR.

As variações cíclicas são resultado de eventos climáticos aleatórios, como o *El Niño* e o *La Niña*, com duração superior a um ano, podendo se estender por décadas. Por não apresentar duração uniforme, a identificação dos ciclos é mais difícil do que a dos outros movimentos das séries (Morettin, 1981). Os movimentos cíclicos apresentaram influência

sobre a  $P$  e  $ET_o$ , sendo que para a  $P$  observou-se maior oscilação dos  $ICI$  ao longo dos anos analisados. Segundo Tardy (1997) a  $P$  geralmente apresenta grandes variações cíclicas.

As variações irregulares resultam de eventos de periodicidade inexplicável, como a ocorrência de catástrofes naturais de curta duração, estando associadas aos movimentos cíclicos. Dessa forma, as variações das séries de  $P$  e  $ET_o$  que não foram explicadas pela tendência, sazonalidade ou ciclicidade, são atribuídas aos movimentos irregulares ou aleatórios.

#### 4 CONCLUSÕES

- As  $fdp$ 's que apresentaram melhor ajuste aos dados de  $ET_o$  e  $P$  decendiais foram a Normal e Gama, respectivamente.
- As séries diária e decendial de  $P$  não seguiram qualquer padrão visual na distribuição de frequência por cor, o que caracterizou sua aleatoriedade.
- As séries anuais de  $P$  e  $ET_o$  não apresentaram tendência significativa de acréscimo ou decréscimo.
- As séries anuais de  $P$  e  $ET_o$  foram influenciadas pelos movimentos sazonais, cíclicos e irregulares.
- A sazonalidade teve pouca influência sobre a  $P$ , mas exerceu grande influência sobre a  $ET_o$ .

#### 5 LITERATURA CITADA

ALBUQUERQUE, M.F.; SOUZA, E.B.; OLIVEIRA, M.C.F. & SOUZA JÚNIOR, J.A. Precipitação nas mesorregiões do estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). Revista Brasileira de Climatologia, Volume 6, 2010.

ALENCAR, L.P.; DELGADO, R.C.; ALMEIDA, T.S. & WANDERLEY, H.S. Comparação De diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 6:337–343, 2011.

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.

ARAUJO, W.F.; ANDRADE JUNIOR, A.S.; MEDEIROS, R.D. & SAMPAIO, R.A. Precipitação pluviométrica mensal provável em Boa Vista, Estado de Roraima, Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 5:563–567, 2001.

ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V. DE & PEREIRA, A.R. Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática. Pelotas: Ed. Universitária UFPel, 1996. 161p.

ÁVILA, L.F.; MELLO, C.R. & VIOLA, M.R. Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13:906–915, 2009.

BERLATO, M.A.; FARENZENA, H. & FONTANA, D.C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 40:423–432, 2005.

BIERAS, A.R. & SANTOS, M.J.Z. Variabilidade e tendência da precipitação pluviométrica anual e mensal do município de Bebedouro (SP), no período de 1983 a 2003. *Climatologia e Estudos da Paisagem*, 1:63–75, 2006.

BRAGANÇA, R. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no Estado do Espírito Santo. 2007. 69p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal – Fitotecnia) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

BOOTH, T.H. & JOVANOVIĆ, T. Improving descriptions of climatic requirements in the CABI Forestry Compendium. A report for the Australian Centre for International Agricultural Research. CSIRO Forestry and Forest Products, Client Report No. 758, 2000.

CALGARO, M.; ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X. & BERNARDON, T. Variação espaço-temporal dos parâmetros para a modelagem estocástica da precipitação pluvial diária no Rio Grande Do Sul. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 29:196–206, 2009.

CONCEIÇÃO, M.A.F. Tendências da precipitação pluvial na Região de Jales (SP). Comunicado Técnico, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Uva e Vinho, 89, 2008. 4p.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. Crop water requirements. FAO – Irrigation and Drainage Paper, 24, Roma, 1977. 144p

FRIZZONE, J.A.; RETTORE, P.R. & PEREIRA, G.T. Análise da distribuição e frequência das precipitações em períodos de 5 e 10 dias, na região de Pereira Barreto (SP), utilizando a distribuição Gama incompleta. *ITEM, Irrigação e Tecnologia Moderna*, n.22, 1985.

GONG, L.; XU, C.; CHEN, D.; HALLDIN, S. & CHEN, Y.D. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329:3–4, 2006.

JENSEN, M.E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York: ASCE, 1974. 215p

HIGA, R.C.V.; WREGE, M.S.; RADIN, B.; BRAGA, H. V.; CAVIGLIONE, J.H.; BOGNOLA, I.; ROSOT, M.A.D.; GARRASTAZU, M.C.; CARAMORI, P.H. & OLIVEIRA, Y.M.M. Zoneamento climático: *Pinus taeda* no sul do Brasil. Colombo:Embrapa florestas, 2008.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Cartas Climáticas do Estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 2000. 1v. Disponível em: <

<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em 03 de setembro de 2012.

JUNQUEIRA JUNIOR, J.A.; GOMES, N.M.; MELLO, C.R. & SILVA, A.M. Precipitação provável para a região de Madre de Deus, Alto Rio Grande: modelos de probabilidades e valores característicos. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, 31:842–850, 2007.

MARQUES Jr, S.; SAAD, J.C.C. & MOURA, M.V.T. Modelo iterativo para estimativa da evapotranspiração de referencia provável. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, 52:221–225, 1995.

MORAES BC, COSTA JMN & COSTA ACL. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. *Acta Amazônica*, 35: 207–214, 2005.

MORETTIN, P.A. & TOLOI, C.M.C. Modelo para Previsão de Séries Temporais. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada, v.1, 1981.

OLIVEIRA, L.F.C. & CARVALHO, D.F. Regionalization of the supplementary irrigation depth and planting time of a brean crop in the State of Goiás, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7:106–110, 2003.

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

PRUITT, W.O.; OETTINGEN, S.V. & MORGAN, D.L. Central California vapotranspiration frequencies. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 98:177–184, 1972.

RIBEIRO, B.T.; AVANZI, J.C.; MELLO, C.R.; LIMA, J.M. & SILVA, M.L.N. Comparação de distribuições de probabilidade e estimativa da precipitação provável para a região de Barbacena, MG. *Ciênc. agrotec.*, Lavras, 31:1297–1302, 2007.

RIBEIRO, A.M. de A. & LUNARDI, D.M.C. A precipitação mensal provável para Londrina, PR, através da função Gama. *Revista Energia na Agricultura*, 12:37–44, 1997.

ROCHA, H.R.; NOBRE, C.A. & BARROS, C.B. Variabilidade natural de Longo prazo no ciclo hidrológico da Amazônia. *Climanálise*. São José dos Campos, 12: 36–42, 1989.

ROSA, H.; MARTINS, S.S. & SILVA, O.H. Atividade florestal nos municípios de Telêmaco Borba, Ortigueira, Reserva, Imbaú e Tibagi: caracterização e perspectivas do setor. *Acta Scientiarum Agronomy*, 28:41–45, 2006.

SAAD, J.C.C. & SCALOPPI, E.J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis, Anais... Florianópolis: ABID, 2:1037–1052, 1988.

SAMPAIO, S.C.; CORRÊA, M.M.; SOUZA, M.R.; GUIMARÃES, J.C. & SILVA, A.M. Precipitação provável para o município de Lavras - MG, utilizando a distribuição Log-normal. *Ciência e Agrotecnologia*, 23:382–389, 1999.

SAMPAIO, S.C.; QUEIROZ, M.M.F.; FRIGO, E.P.; LONGO, A.J. & SUSZEK, M. Estimativa e distribuição de precipitações decendiais para o Estado do Paraná. *Irriga*, 12:38–53, 2007.

SANTOS, C.A.C.; BRITO, J.I.B.; RAO, T.V.R. & MENEZES, H.E.A. Tendências dos índices de precipitação no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24:39–47, 2009.

SANSIGOLO, C.A. Distribuições de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, 23:341–346, 2008.

SHIMIZU, J. Y. & HIGA, A. R. Variação racial do *Pinus taeda* L. no sul do Brasil até o sexto ano de idade. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, 2:1–25, 1981.

SILVA, F.C.; FIETZ, C.R.; FOLEGETTI, M.V. & PEREIRA, F.A.C. Distribuição e frequência da evapotranspiração de referência de Cruz das Almas, BA. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2:284-286, 1998.

SILVA, M.E.S. & GUETTER, A.K. Mudanças climáticas regionais observadas no estado do Paraná. *Revista Terra Livre*, São Paulo-SP, 1:111–126, 2003.

SILVA, A.O.; MOURA, G.B.A.; SILVA, E.F.F.; LOPES, P.M.O. & SILVA, A.P.N. Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência sob diferentes regimes de precipitações em Pernambuco. *Revista Caatinga*, Mossoró, 24:135–142, 2011.

SOCOL, O.J.; CARDOSO, C.O. & MIQUELLUTI, D.J. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14: 569–574, 2010.

THOM, H.C.S. A note of Gama distribution. *Monthly Weather Review*, Washington, 86:117–222, 1958.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; CUARTAS, L.A.; NOBRE, A.D.; WATERLOO, M.J. & OLIVEIRA, S.M. The water balance of an amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. *Hydrological processes*, 22: 2133–2147, 2007.

TARDY, Y. Geoquímica Global: oscilações climáticas e evolução do meio ambiente desde quatro bilhões de anos. *Estudos Avançados*, 11: 149–173, 1997.



### **CAPÍTULO 3 – RELAÇÕES HÍDRICAS PARA CULTURA DO *Pinus taeda* NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ**

#### **RESUMO**

O *Pinus taeda* é a espécie florestal mais plantada no sul do Brasil e a disponibilidade de água no solo influencia fortemente o seu cultivo. A partir de um balanço hídrico agrícola (*BHA*) diário, teve-se como objetivo no presente trabalho caracterizar as relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda*, na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná, utilizando uma série de 31 anos de dados climáticos diários. A estimativa da evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) foi realizada com o método de Penman-Monteith. Os *BHA*'s foram estimados com auxílio de rotinas computacionais dispostas em uma planilha eletrônica, tendo como entrada dados de precipitação (*P*), *ET<sub>o</sub>*, coeficiente de cultivo ( $kc = 0,95$ ), capacidade de água disponível (*CAD* = 222,4 mm) e fração de água disponível ( $p = 0,7$ ). O armazenamento médio mensal de água no solo foi favorecido pela *P* e pela menor irradiância solar ocorrida na região. O excedente hídrico (*EXC*), deficiência hídrica (*DEF*) e armazenamento da água no solo (*ARM*) foram afetados pela ciclicidade e irregularidade da *P*.

Palavras-chave: Balanço hídrico. Componentes hídricas. Espécies florestais.

### CHAPTER 3 – WATER RELATIONS FOR *Pinus taeda* IN THE REGION OF TELEMACO BORBA, PARANA STATE

#### ABSTRACT

*Pinus taeda* is the major forest species in southern Brazil and the availability of water in the soil strongly influences its cultivation. The aim of this work was, from a daily water balance, to characterize the water relations for the culture of *Pinus taeda* in the region of Telemaco Borba, Parana State. Were used series of 31 years of daily data. The reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) was estimate by the Penman-Monteith method. The water balances were estimated with the aid of a spreadsheet which used data from precipitation ( $P$ ),  $ET_o$ , crop coefficient ( $k_c = 0.95$ ), available water capacity ( $AWC = 222,4$  mm) and fraction of available water ( $p = 0.7$ ). The average monthly water storage in the soil was favored by  $P$  and lower solar irradiance occurred in the region. The surplus ( $EXC$ ), water deficit ( $DEF$ ) and soil water storage ( $SWS$ ) were affected by cyclicity and irregularity of  $P$ .

Key-words: Water balance. Water components. Forest species.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a implantação de sistemas silviculturais com a utilização de espécies exóticas é uma alternativa econômica sustentável, já que reduz a pressão sobre os ecossistemas naturais permitindo a extração de madeira e produtos não-madeiráveis (REMADE, 2006).

Segundo a Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado (SEAB) e Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2012) a área com cobertura florestal de pinus no Paraná equivale a 38% de todos os cultivos deste gênero no país. O município de Telêmaco Borba apresenta grande importância econômica no Estado devido ao crescimento da silvicultura (Rosa et al., 2006). Na região central do Estado do Paraná, que compreende o município de Telêmaco Borba, a área de florestas corresponde a 48% da área total do Estado, sendo 25,43% em reflorestamento, 16,48% em áreas de preservação permanente e 6,09% em florestas nativas. Portanto, é possível constatar a expressiva presença da atividade florestal, tanto das florestas plantadas como de florestas nativas na região (Rosa et al., 2006; Rochadelli et al., 2008).

Dentre as espécies plantadas, as principais são do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*, sendo cerca de 60% de pinus, com predomínio das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* e, 40% de eucalipto, com predomínio das espécies *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis* (Rosa et al., 2006). Particularmente, o *Pinus taeda* é a espécie mais plantada no sul do Brasil, pelo seu elevado incremento volumétrico e baixo teor de resina na madeira (EMBRAPA, 2005).

Segundo Doldan (1990) a disponibilidade de água no solo é um dos fatores físicos que mais influencia o cultivo do pinus. A umidade do solo é essencial para o crescimento das plantas, tanto pelo fornecimento de água quanto pela mobilização e absorção de nutrientes (Morris et al., 2006). Dessa forma, o estudo das relações hídricas é uma ferramenta útil que possibilita definir as variações de umidade no solo ao longo do tempo, fazer inferências a respeito da transpiração das plantas, determinar as regiões nas quais o sistema radicular é mais efetivo, dentre outros efeitos da vegetação sobre a água no solo (Leite et al., 1999).

O balanço hídrico é uma das várias maneiras de se monitorar a variação do armazenamento de água no solo (*ARM*), evapotranspiração real (*ER*), deficiência hídrica (*DEF*) e excedente hídrico (*EXC*) (Bruno et al., 2007; Sparovek et al., 2007). Seu cálculo é importante para as atividades agrícolas, sendo útil também para a caracterização climática de

uma região (Souza & Frizzone, 2007; Silva et al., 2008a; Souza & Gomes, 2007). É uma metodologia que possibilita o estudo das condições hídricas, podendo ter suas componentes medidas diretamente no campo (Reichardt & Timm, 2004) ou estimadas a partir de dados climatológicos, por meio da utilização de modelos específicos (Pereira, 2005).

Nesse contexto, teve-se como objetivo no presente trabalho caracterizar as relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda* na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná, auxiliando o desenvolvimento de alternativas que visem o uso racional de água nas atividades produtivas, sem comprometer o equilíbrio ambiental, favorecendo a expansão da atividade florestal de forma eficiente.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Local de realização do trabalho

As análises do presente trabalho foram realizadas para o município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná (Figura 3.1). A região está localizada no Segundo Planalto Paranaense e, segundo a classificação de Köppen, apresenta clima tipo Cfa/Cfb, subtropical úmido transicional para temperado propriamente dito, com temperatura média no mês mais frio inferior a 16°C, com ocorrência de geadas e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes (IAPAR, 2000).

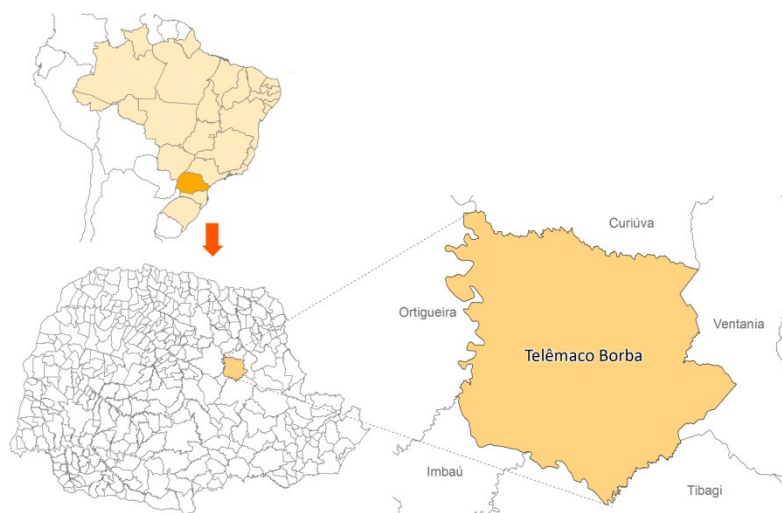


Figura 3.1 – Localização do município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná, onde se encontra a área de estudo.

## 2.2 Dados climáticos utilizados nas análises

Foi utilizada uma série de dados climatológicos diários (janeiro de 1981 a dezembro de 2010) provenientes de uma estação climatológica instalada na Fazenda Monte Alegre, pertencente à empresa Klabin Florestal, localizada na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná, nas coordenadas 24°13' de latitude Sul, 50°32' de longitude Oeste e 885 m de altitude média. Os dados necessários para o estudo foram: precipitação pluviométrica (mm), temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), umidade relativa média (%), radiação solar incidente acumulada (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), insolação diária (h d<sup>-1</sup>) e velocidade do vento a dois metros de altura (m s<sup>-1</sup>).

## 2.3 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)

A estimativa da ET<sub>o</sub> foi realizada com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (Allen et al., 1998) (Apêndice 1).

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

Sendo: ET<sub>o</sub> – evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C<sup>-1</sup>); R<sub>n</sub> – radiação líquida na superfície (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); G – balanço do fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); γ<sub>psy</sub> – constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>); T – temperatura média do ar (°C); u<sub>2</sub> – velocidade do vento a dois metros de altura (m s<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> – pressão de saturação de vapor (kPa); e<sub>a</sub> – pressão atual do vapor (kPa).

## 2.4 Modelo de balanço hídrico agrícola (BHA) utilizado nas análises

As simulações do BHA diário foram realizadas com auxílio de um programa computacional desenvolvido em linguagem de programação *Visual Basic Application* (VBA - *Macros*), denominado “MORETTI – Módulo: Balanço hídrico seqüencial (periodicidade diária), Versão 1.0” (Souza, 2008).

Para realizar a simulação do BHA diário, o programa necessitou dos dados diários de precipitação pluvial (P) e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), 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 uma determinada cultura (Souza, 2008).

## 2.5 Coeficiente de cultivo ( $kc$ ) e evapotranspiração da cultura ( $ETc$ )

Conforme a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (Allen et al., 1998), os valores de  $kc$  foram considerados iguais a 0,95. No programa de Souza (2008) os valores de  $kc$  foram utilizados para transformar  $ETo$  em evapotranspiração da cultura ( $ETc$ ). Assim, os  $i$ -ésimos valores de  $ETc_i$  foram obtidos com a equação:

$$ETc_i = ETo_i \cdot kc$$

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

## 2.6 Capacidade de água disponível ( $CAD$ ) e água disponível no solo ( $AD$ )

Os atributos físico-hídricos para o cálculo da capacidade de água disponível ( $CAD$ ) foram determinados em um experimento preliminar, realizado em Telêmaco Borba-PR (Pachechenik, 2010). Os cálculos do  $BHA$  diário foram realizados considerando  $CAD$  média de 222,4 mm (Apêndice 3).

A  $CAD$  foi obtida por meio da seguinte equação:

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

Sendo:  $CAD_i$  – capacidade de água disponível no solo na  $i$ -ésima profundidade (mm);  $\theta_{CC}$  – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo, na  $i$ -ésima profundidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_{PMP}$  – umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente, na  $i$ -ésima profundidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $z_i$  –  $i$ -ésima profundidade do 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 expressão:

$$AD = CAD \cdot p$$

Sendo:  $AD$  – água disponível no solo para a cultura (mm);  $CAD$  – capacidade de água disponível no solo (mm);  $p$  – fração água disponível no solo para uma determinada cultura (adimensional).

Para a realização das análises considerou-se um valor único de fração  $p$ , sendo  $p = 0,7$ , que contempla o grupo das coníferas (Allen et al., 1998). A estimativa do armazenamento de água no solo ou “negativo acumulado” (Souza, 2008) foi realizada utilizando a opção “Equação Cossenoidal”, que realiza os cálculos a partir das seguintes condições:

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

$$ARM = CAD - L$$

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

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

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

O valor inicial do armazenamento da água no solo ( $ARM$ ), nos balanços hídricos realizados para cada ano, foi considerado igual ao valor do  $ARM$  do último dia (31 de dezembro) do ano anterior. Sendo que, para o primeiro ano da série de dados (1981), o valor inicial do  $ARM$ , nos  $BHA$ 's diários realizados, foi considerado igual ao valor do  $ARM$  do dia 31/12/1980, após o cálculo do balanço hídrico do período de 01/01/1980 à 31/12/1980.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os  $BHA$ 's diários realizados para a região de Telêmaco Borba no período entre 1981 e 2011 ( $CAD = 222,4$  mm) apresentaram valores médios de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), evapotranspiração real ( $ER$ ), deficiência hídrica ( $DEF$ ) e excedente hídrico ( $EXC$ ) iguais a  $1093,2$  mm ano<sup>-1</sup>,  $1041,5$  mm ano<sup>-1</sup>,  $1025,5$  mm ano<sup>-1</sup>,  $12,8$  mm ano<sup>-1</sup> e  $587,3$  mm ano<sup>-1</sup>, respectivamente, ao longo dos anos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Valores anuais das componentes do *BHA* para a cultura do Pinus, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

Anos	<i>ET<sub>o</sub></i>	<i>ET<sub>c</sub></i>	<i>P</i>	<i>P-ET<sub>c</sub></i>	<i>ER</i>	<i>DEF</i>	<i>EXC</i>
	----- (mm ano <sup>-1</sup> ) -----						
1981	1115,9	1060,1	1367,0	306,9	1037,6	22,4	328,1
1982	1088,6	1034,1	1822,8	788,7	1034,1	0,0	789,7
1983	1021,3	1014,4	2166,3	1151,9	1014,4	0,0	1143,5
1984	1125,1	1068,9	1600,8	531,9	1068,9	0,0	531,9
1985	1151,9	1094,3	1256,8	162,5	1082,4	11,9	361,2
1986	1076,2	1022,4	1830,5	808,1	976,1	46,4	674,5
1987	1049,1	996,6	1610,7	614,0	996,6	0,0	638,4
1988	1140,1	1083,1	1282,5	199,4	953,2	129,8	271,5
1989	1069,7	1016,2	1877,1	860,9	1016,2	0,0	847,4
1990	1056,2	1003,4	1705,5	702,1	1003,4	0,0	796,5
1991	1129,5	1073,1	1365,3	292,2	1070,2	2,8	220,6
1992	1081,8	1074,8	1914,9	840,2	1027,7	0,0	867,3
1993	1089,5	1035,0	1444,6	409,6	1035,0	0,0	495,3
1994	1105,0	1049,7	1641,8	592,0	1049,7	0,0	506,3
1995	1011,0	960,4	1496,2	535,7	960,4	0,0	493,0
1996	1125,2	1069,0	1496,2	427,2	1069,0	0,0	432,1
1997	1065,1	1011,9	1982,4	970,5	1008,2	3,7	928,4
1998	1118,7	1062,8	1545,9	483,1	1008,2	3,7	928,4
1999	1134,2	1077,4	1310,8	233,4	1009,2	68,2	422,5
2000	1098,8	1043,8	1643,3	599,5	1040,1	3,7	447,7
2001	1100,7	1045,7	1733,2	687,5	1045,7	0,0	702,2
2002	1137,0	1080,1	1579,8	499,7	1080,1	0,0	513,2
2003	1109,9	1054,4	1596,1	541,7	1054,4	0,0	521,2
2004	1131,8	1075,2	1665,0	589,8	1075,2	0,0	649,0
2005	1119,7	1063,7	1340,2	276,5	1063,3	0,4	339,9
2006	1136,1	1079,3	1261,4	182,1	975,8	103,5	169,8
2007	1161,7	1103,7	1506,3	402,6	1103,7	0,0	395,8
2008	1106,3	1051,0	1382,3	331,3	1049,9	1,1	491,4
2009	1049,2	996,8	2008,1	1011,3	996,8	0,0	854,2
2010	1065,5	1012,3	1578,3	566,0	1012,3	0,0	582,3
2011	917,5	871,6	1764,4	892,8	871,6	0,0	863,7

Foi possível observar em todos os anos analisados que a *P* foi maior que a *ET<sub>o</sub>* (Tabela 3.1 e Figura 3.2), contribuindo para que os *EXC*'s sempre fossem maiores que as *DEF*'s na região de Telêmaco Borba (Figura 3.3). Os maiores excedentes hídricos ocorreram no ano de 1983 (1143,5 mm ano<sup>-1</sup>) quando a *P* chegou a 2166,3 mm ano<sup>-1</sup>. Além disso, favoravelmente, devido à uniformidade das precipitações, as *DEF*'s foram baixas ao longo dos anos analisados, o que determinou altos valores de *ET<sub>c</sub>* e *ER* (Figura 3.2 e 3.3).



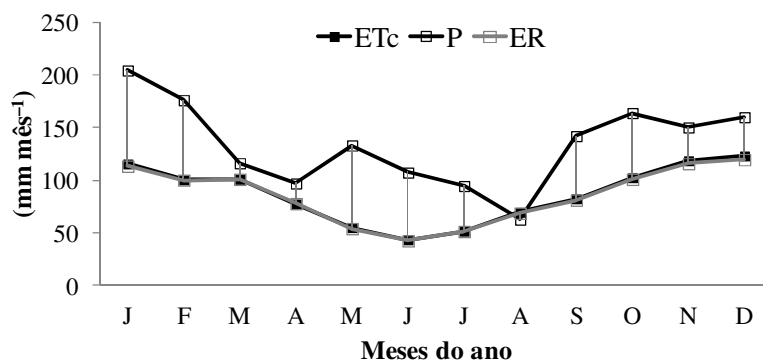


Figura 3.2 –  $ET_c$ ,  $ER$  e  $P$  médios mensais para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

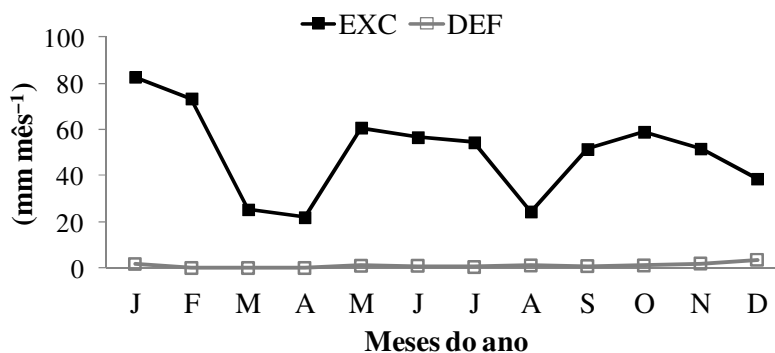


Figura 3.3 – Deficiência e excedente hídricos médios mensais para cultura do Pinus, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

Segundo Oki (2002), em condições climáticas normais, a  $ET_c$  de uma floresta de pinus varia de 60% à 90% da precipitação, existindo variações dependendo das características climáticas de cada região. No presente trabalho, a  $ET_c$  variou de 50% à 70% da precipitação, provavelmente devido ao alto índice pluviométrico, bem como às condições de temperatura da região.

A estação chuvosa ocorreu predominantemente entre os meses de outubro a março (Figura 3.2). A identificação desse período é importante para o planejamento das operações de manejo na cultura do pinus, principalmente durante a fase de crescimento das mudas, quando tanto o excesso quanto a falta de água podem proporcionar sérios problemas a sua formação (EMBRAPA, 2005). Câmara & Lima (1999) comenta que a fase inicial de crescimento das espécies arbóreas são as que demandam mais água, devido ao seu crescimento e produção de biomassa.

Em todos os meses do ano ocorreram excedentes hídricos (Figura 3.3). As menores deficiências e maiores excedentes hídricos, provavelmente, são explicados pela latitude e altitude em que se encontra o município de Telêmaco Borba, onde ocorre menor irradiância solar. Áreas com maior irradiância solar, geralmente, apresentam maiores deficiências e menores excedentes hídricos (Souza et al., 2006). Além disso, regiões de maior altitude possuem menores temperaturas em comparação com outras localidades, resultando em menor disponibilidade energética, menor demanda evapotranspirativa e, conseqüentemente, menores deficiências e maiores excedentes hídricos no solo. Para Castro et al. (2010) o nível de deficiência hídrica aceitável para regiões aptas ao plantio de *Pinus taeda* é de, no máximo, 50 mm ano<sup>-1</sup>. No presente trabalho, considerando a CAD de 222,4 mm, a DEF média anual foi de 12,8 mm ano<sup>-1</sup>. Esses resultados são explicados pela maior capacidade de retenção de água em solos com maior CAD, que geram menores DEF hídricas ao longo dos meses do ano (Silva et al., 2008b). Para Bognola et al. (2010), sob condições de baixa DEF, solos com maior disponibilidade de água, reduzem o desenvolvimento e crescimento das árvores de *Pinus taeda*. Segundo Auer & Júnior (2000) elevadas precipitações ou DEF severa podem ser responsáveis pelo aparecimento de doenças como a queima de ponteiros em mudas da espécie. Além disso, a DEF reduz a expressão dos efeitos das propriedades químicas nos solos sobre o crescimento de *Pinus taeda* (Bellote & Dedecek, 2011).

Viera & Shumacher (2010) verificaram para o Estado do Rio Grande do Sul, que os meses de abril a junho destacam-se como o período de maior deposição de serapilheira na cultura do pinus. Os autores consideraram que a elevação da perda de folhagem pode ser uma estratégia fisiológica de sobrevivência das plantas, que submetidas à ocorrência de baixa precipitação, diminuem a folhagem e, conseqüentemente, a perda de água por transpiração. Segundo Chang & Aguilar (1980) a ocorrência de precipitação, principalmente àquelas ocorridas nos verões anteriores, apresentam grande influência no crescimento das árvores de *Pinus taeda*, podendo ser utilizadas como eficazes indicadores de crescimento para a cultura. Baseando-se na série de P (Tabela 3.1 e Figura 3.2) e nas considerações de Chang & Aguilar (1980) e Viera & Shumacher (2010) acredita-se que a região de Telêmaco Borba tem bom índice pluviométrico para a cultura do Pinus, que apresentará maior deposição de serapilheira entre os meses de junho e agosto.

Devido aos excedentes hídricos ocorridos, o armazenamento médio mensal de água no solo foi de 184 mm mês<sup>-1</sup> (Figura 3.4). Por conta da alta capacidade de retenção de água, solos com alta CAD possuem maior capacidade de suprir a demanda atmosférica de água,

enquanto que solos de menor *CAD* esgotam suas reservas em períodos curtos de estiagem. Portanto, a deficiência hídrica inicia-se antes e é mais intensa nos solos com menor *CAD* (Silva et al., 2008b). Essa constatação é importante, pois a capacidade de retenção de água no solo é um dos fatores físicos do solo que mais interferem no crescimento de *Pinus taeda* (Doldan, 1990; Morris et al., 2006). Para Dedecek et al. (2008) os maiores teores de água no solo, exceto sob condições de elevado excedente hídrico, favorecem o incremento do crescimento de árvores de *P.taeda*.

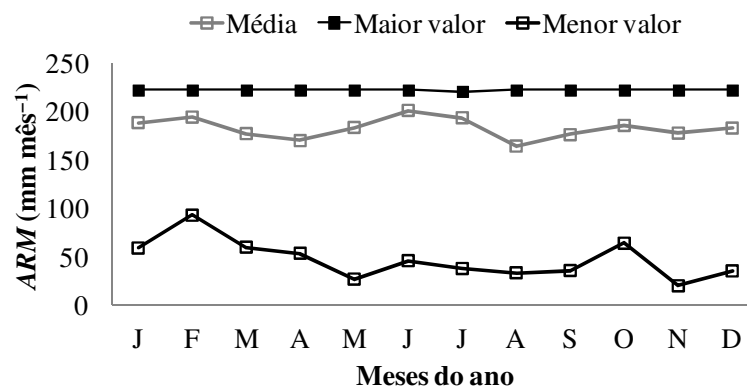


Figura 3.4 – Armazenamento médio de água no solo no período mensal, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

Segundo Coelho et al. (2006) o excesso de água no solo causa redução no crescimento e desenvolvimento das raízes de algumas espécies. No município de Telêmaco Borba o plantio de espécies florestais é expressivo, de modo particular, a cultura do Pinus. A espécie apresenta elevada plasticidade, pois é altamente tolerável a períodos de alagamento, deficiência hídrica e geadas. Portanto, apresenta adaptabilidade às condições do município, considerado como área recomendada para o cultivo da espécie (Higa et al., 2008).

Observou-se que o *EXC* foi influenciado pela *P*, mas pouco influenciado pela *ETo*, no período anual. Isso pode ser explicado pela ciclicidade e irregularidade da *P* (Figura 3.5).

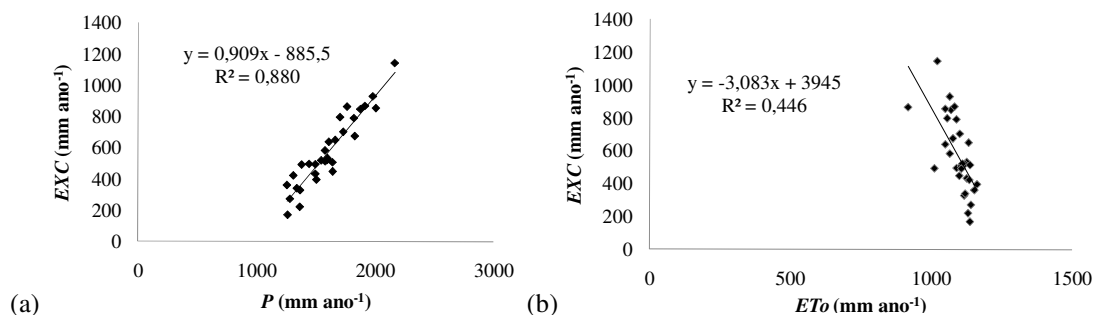


Figura 3.5 – Regressão linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtidos entre os valores mensais de (a) *P* e *EXC* e, (b) *ETo* e *EXC*, para um período de 31 anos, no município de

Telêmaco Borba – PR.

Os movimentos cíclicos e irregulares da  $P$  ocorrem devido à existência de oscilações climáticas com periodicidades maiores que um ano, como o *El Niño* e o *La Niña*. Segundo o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC (INPE, 2012) esses movimentos podem afetar o clima em escala regional e global. O *El Niño* caracteriza-se por um aquecimento anormal das águas do oceano Pacífico que modifica os padrões de vento e altera o regime de chuvas. O *La Niña* caracteriza-se pelo resfriamento anormal das águas do oceano Pacífico Tropical. Nem sempre as regiões afetadas pelo *El Niño* sofrem impactos significativos no tempo e clima devido ao *La Niña*. Assim, no Estado do Paraná, nos anos influenciados pelo *El Niño* ocorreu o aumento das precipitações, principalmente na primavera, e chuvas intensas de maio a julho. Nos anos influenciados pelo *La Niña* ocorreram baixíssimas precipitações. Analisando-se as últimas ocorrências do *El Niño*, pode-se observar que os anos das séries de  $P$  mais influenciados por esses fenômenos foram os anos de 1982 a 1983, 1990 a 1993 e 1997 a 1998. Para o *La Niña* os anos mais influenciados foram 1988 a 1989 e 2007 a 2008. Assim, pode-se afirmar que, para a série de anos analisados, os anos que ocorreram o *El Niño* foram os de maior  $P$  e, conseqüentemente, os de maior  $EXC$  hídrico.

A  $DEF$  sofreu pequena interferência da  $P$  e da  $ETo$  no período anual (Figura 3.6). Nesse caso, pode-se afirmar que a  $DEF$  foi pouco influenciada pelos efeitos cíclicos da  $P$  e, conseqüentemente, pelos fenômenos *El Niño* e *La Niña*. A  $DEF$  apresentou tendência diferente do  $EXC$ , pois quando os valores foram agrupados em meses ou anos, a  $DEF$  pode ter ocorrido mesmo que a  $P$  tenha sido superior à  $ETo$ , o que tende a mascarar os valores estimados e comprometer a correlação entre os dados quando da realização de uma análise de regressão.

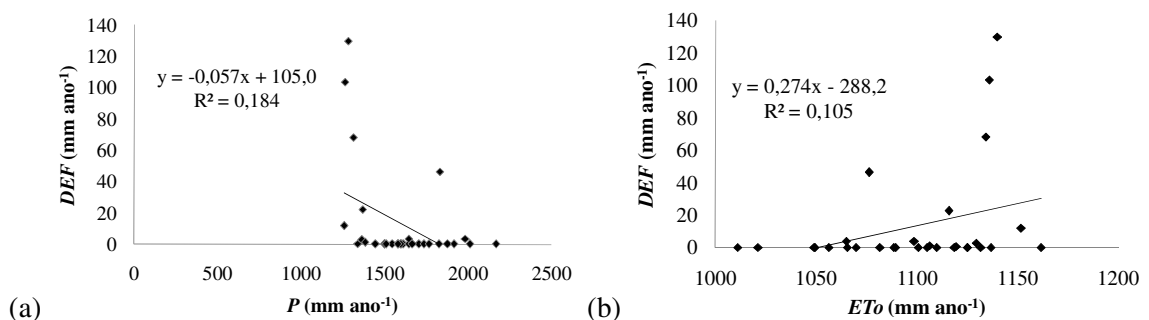


Figura 3.6 – Regressão linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtidos entre os valores anuais de (a)  $P$  e  $DEF$  e, (b)  $ETo$  e  $DEF$ , para um período de 31 anos, no município de

Telêmaco Borba – PR.

Apesar de o *ARM* ter sido pouco influenciado pela *P* e *ETo*, foi melhor explicado pela *P*, sendo que os movimentos cíclicos e irregulares foram os que melhor determinaram a sua variação ao longo do tempo (Figura 3.7).

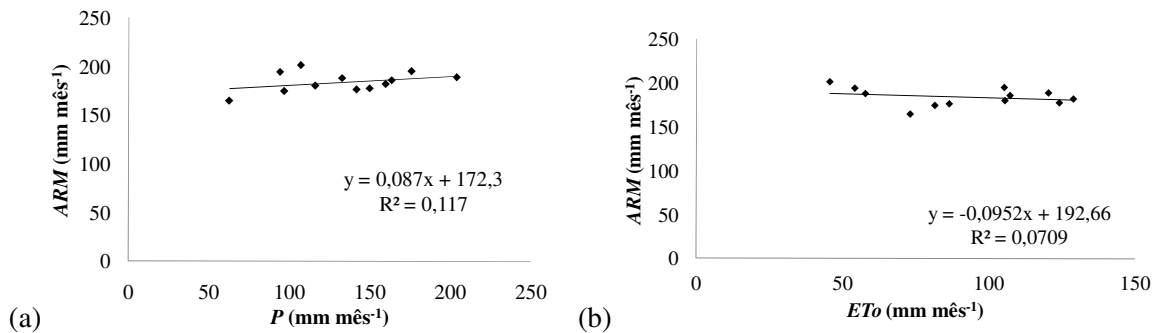


Figura 3.7 – Regressão linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtidos entre os valores anuais de (a) *P* e *ARM* e, (b) *ETo* e *ARM*, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

#### 4 CONCLUSÕES

- O armazenamento médio mensal de água no solo foi favorecido pela precipitação e pela menor irradiância solar ocorrida na região.
- O *EXC*, a *DEF* e o *ARM* foram afetados pela ciclicidade e irregularidade da *P*.

#### 5 LITERATURA CITADA

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Disponível em: <[www.abraflor.org.br/](http://www.abraflor.org.br/)>. Acesso em 22 de agosto de 2012.

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.

AUER, C.G. & JUNIOR, A.G. Queima de ponteiros de mudas de *Pinus taeda*. Comunicado técnico – EMBRAPA, 43:1–2, 2000.

BELLOTE, A.F.J. & DEDECEK, R.A. Atributos Físicos e Químicos do Solo e suas Relações com o Crescimento e a Produtividade do *Pinus taeda*. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, 53:21–38, 2011.

BOGNOLA, I.A.; DEDECEK, R.A.; LAVORANTI, O.J. & HIGA, A.R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, 30:37–49, 2010.

BRUNO, I.P.; SILVA, L.C.; REICHARDT, K; DOURADO-NETO, D.; BACCHI, O.O.S. & VOLPE, C.A. Comparação entre balanços hídricos climatológicos e de campo para uma cultura de café. Scientia Agrícola, Piracicaba, 64:215–220, 2007.

CÂMARA, C.D. & LIMA, W.P. Corte raso de uma plantação de *Eucalyptus saligna* de 50 anos: impactos sobre o balanço hídrico e a qualidade da água em uma microbacia experimental. Scientia Florestalis, 56:41–58, 1999.

CASTRO, F.S.; PEZZOPANE, J.; PEZZOPANE, J.; CECÍLIO, R. & XAVIER, A. Zoneamento agroclimático para espécies do gênero *Pinus* no Estado do Espírito Santo. Floresta, 40:235–250, 2010.

CHANG, M. & AGUILAR, G.J.R. Effects of climate and soil on the radial growth of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in a humid environment of the southeastern U.S.A. Forest Ecology Management, 3:141–150, 1980.

COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A. SIMÕES, W. L. & COELHO, Y.S. Irrigação em citros nas condições do nordeste do Brasil. Laranja, 27:297–320, 2006.

DEDECEK, R.A.; FIER, I.S.N.; SPELTZ, R. & LIMA, L.C.S. Influência do sítio no desenvolvimento do *Pinus taeda* aos 22 anos: 1. características físico-hídricas e químicas do solo. Revista Floresta, 38:507–516, 2008.

DOLDAN, M.E.Q. Desenvolvimento da altura dominante de *Pinus taeda* L. como resposta aos estímulos dos fatores do meio, na região de Ponta Grossa. Revista Floresta, 20:54–55, 1990.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Florestas, Sistemas de Produção, n.5, 2005.

HIGA, R.C.V.; WREGGE, M.S.; RADIN, B; BRAGA, H. V.; CAVIGLIONE, J.H.; BOGNOLA, I.; ROSOT, M.A.D.; GARRASTAZU, M.C.; CARAMORI, P.H. & OLIVEIRA, Y.M.M. Zoneamento climático: *Pinus taeda* no sul do Brasil. Colombo:Embrapa florestas, 2008.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. El Niño e La Niño. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em 22 de agosto de 2012.

LEITE, F.P.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SANS, L.M.A. & FABRES, A.S. Relações hídricas em povoamento de eucalipto com diferentes densidades populacionais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 23:9–16, 1999.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Cartas Climáticas do Estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 2000. 1v. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em 03 de setembro de 2012.

MORRIS, L.A.; LUDOVICI, K.H.; TORREANO, S.J.; CARTER, S.A.; LINCOLN, M.C. & WILL, R.E. An approach for using general soil physical condition-root growth relationships to predict seeding growth response to site preparation tillage in loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 227:169–177, 2006.

OKI, K.V. Impactos da colheita de *Pinus taeda* sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e a ciclagem de nutrientes em microbacias. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz", Piracicaba, 2002. 85p. (Dissertação de mestrado)

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. Simplificando o Balanço Hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia*, 64: 311–313, 2005.

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

REVISTA DA MADEIRA (REMADE). n. 98, agosto 2006. Disponível em: [http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=948](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=948). Acesso em: 07 de agosto de 2012.

ROCHADELLI, R.; SILVA, J.C.G.L.; RODRIGUES, F.; SCHNEIDER, A.V. & PETLA, D. Expansão florestal via fomento no segundo planalto paranaense: uma abordagem a partir da estrutura fundiária das propriedades rurais da região. *Cerne*, Lavras, 14:163–169, 2008.

ROSA, H.; MARTINS, S.S. & SILVA, O.H. Atividade florestal nos municípios de Telêmaco Borba, Ortigueira, Reserva, Imbaú e Tibagi: caracterização e perspectivas do setor. *Acta Scientiarum Agronomy*, 28:41–45, 2006.

SILVA, M.I.S.; GUIMARÃES, E.C. & MAVARES, T. Previsão da temperatura média mensal de Uberlândia, MG, com modelos de séries temporais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12:480–485, 2008a.

SILVA, J.C.; HELDWEIN, A.B.; TRENTIN, G.; STRECK, N.A. & MARTINS, F.B. Funções de distribuição de probabilidade decendial e mensal para a deficiência hídrica no solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, 38:1893–1899, 2008b.

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 (Programa computacional).

SOUZA, J.L.M. & FRIZZONE, J.A. Simulação do balanço hídrico para a cultura do cafeeiro nas regiões de Lavras e Uberlândia. *Scientia Agraria*, 8:291–301, 2007.

SOUZA, J. L. M. & GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, 30:153–163, 2007.

SOUZA, M.J.H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H.G.; LEITE, F.P. & MINUZZI, R.B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. *Revista Árvore*, 30:399–410, 2006.

SPAROVEK, G.; JONG VAN LIER, Q. & DOURADO-NETO, D. Computer assisted Köppen climate classification for Brazil. *International Journal of Climatology*, 27:257–266, 2007.

VIERA, M. & SCHUMACHER, M.V. Variação mensal da deposição de serapilheira em povoamento de *Pinus taeda* l. em área de campo nativo em Cambará do Sul – RS. *Revista Árvore*, 34:487–494, 2010.



## CAPÍTULO 4 – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE E DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES DE DEFICIÊNCIA E EXCEDENTE HÍDRICOS PARA A REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ

### RESUMO

O conhecimento dos padrões de distribuição e de movimento da deficiência (*DEF*) e excedente hídrico (*EXC*) é fundamental para o entendimento e determinação de períodos críticos para o cultivo e planejamento de culturas agrícolas. Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os parâmetros estatísticos de cinco funções densidade de probabilidade (*fdp*) ajustadas aos valores decendiais de *DEF* e *EXC*, calcular a magnitude de sua ocorrência para os períodos de retorno de 4, 5, 10 e 15 anos, com a *fdp* de melhor ajuste, bem como realizar a decomposição temporal das séries de *DEF* e *EXC*, observando as possíveis influências das oscilações das duas variáveis sobre o plantio de *Pinus taeda*, no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Para tanto, foram consideradas as distribuições de probabilidade Normal, Triangular, Gama, Exponencial e Uniforme, na estimativa da *DEF* e *EXC* a 75%, 80%, 90% e 93% de probabilidade. As séries temporais foram decompostas para obtenção dos padrões de tendência, ciclicidade, sazonalidade e irregularidade, utilizando-se os métodos das médias móveis, mínimos quadrados, razão para a média móvel e remoção da componente tendência, respectivamente. Para a verificação do ajustamento das distribuições de probabilidade às séries de dados foram aplicados testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% probabilidade. A *fdp* Gama foi a que apresentou melhor ajuste às séries de *DEF* e *EXC*. As séries anuais de *DEF* e *EXC* não apresentaram tendência significativa de acréscimo ou decréscimo. A sazonalidade teve pouca influência sobre a *DEF* e *EXC*. A ciclicidade teve grande influência sobre a *DEF* e *EXC*, sendo que para a *DEF* a precipitação (*P*) teve grande influência.

Palavras-chave: Componentes do balanço hídrico. Período de retorno. Tendência.

## CHAPTER 4 – PROBABILITY DENSITY FUNCTIONS AND BREAKDOWN OF SURPLUS AND DEFICIT SERIES OF WATER FOR TELEMACO BORBA, PARANA STATE

### ABSTRACT

The knowledge of patterns of distribution and movements of water deficit (*DEF*) and water surplus (*EXC*) is fundamental to understanding and determination of critical periods and planning for the cultivation of crops. The aim of this work was to determine the parameters of five statistical probability density functions (*pdf*'s) adjusted decennial values *DEF* and *EXC*, calculate the magnitude of its occurrence for the return periods of 4, 5, 10 and 15 years with the *pdf* of best fit, as well as perform the decomposition of temporal series and *DEF* and *EXC*, noting the possible influences of the oscillations of the two variables on the planting of *Pinus taeda* in Telêmaco Borba, Parana State. Therefore, was considered the probability distributions Normal, Triangular, Gamma, Exponential and Uniform, and to estimate the *DEF* and *EXC* 75%, 80%, 90% and 93% probability. The time series were decomposed to obtain patterns of trend, cyclicity, seasonality and irregularity, using the methods of moving averages, least squares, reason for the removal and moving average trend component, respectively. To check the adjustment of probability distributions of data, compliance tests of Kolmogorov-Smirnov were applied at 5% probability. The Gamma *fdp* showed the best fit to the series of *DEF* and *EXC*. The annual series of *DEF* and *EXC* showed no significant trend of increase or decrease. Seasonality had little influence on the *DEF* and *EXC*. The cyclicity had great influence on the *EXC* and *DEF*, and *DEF* to the precipitation (*P*) had great influence.

Key-words: Water balance components. Payback period. Tendency.

## 1 INTRODUÇÃO

O município de Telêmaco Borba apresenta grande importância econômica no Estado do Paraná devido ao crescimento da silvicultura, em que cerca de 60% das florestas plantadas são do gênero pinus, com predomínio da espécie *Pinus taeda* (Rosa et al., 2006).

Segundo Doldan (1990) a disponibilidade de água no solo é um dos fatores físicos que mais influencia o cultivo do pinus. A ocorrência de deficiência hídrica é uma das principais causas de perdas de produtividade para a cultura, devido à redução da taxa fotossintética (Vose & Swank, 1994), redução do aporte de nutrientes às árvores, diminuição na velocidade de mineralização da matéria orgânica e, em níveis extremos de deficiência hídrica, o colapso do citoplasma das células (Sands & Mulligans, 1990).

A disponibilidade de água no solo é influenciada pela temperatura, diretamente relacionada à taxa evapotranspirativa, e distribuição espaço-temporal da precipitação (Souza et al., 2006). O balanço hídrico é a metodologia mais utilizada para a avaliação do armazenamento de água no solo e quantificação dos déficits e excessos hídricos ao longo do tempo, já que possibilita a integração da precipitação e evapotranspiração, variáveis de maior influência sobre a disponibilidade hídrica (Fietz et al., 2005).

Segundo Maayar et al. (2009) a identificação de períodos de escassez ou excesso de água no solo, e a determinação de períodos críticos em relação ao déficit hídrico no solo, destacam-se como uma importante aplicação do balanço hídrico, principalmente em condições de agricultura irrigada. Nesse contexto, o conhecimento dos padrões de distribuição e de movimento da deficiência hídrica (*DEF*) e do excedente hídrico (*EXC*), ao longo do tempo, é importante para o entendimento e determinação de períodos críticos, sendo relevante no planejamento e manejo racional da produção agrícola (Ribeiro et al., 2007; Ávila et al., 2009).

Várias distribuições de probabilidade podem ser utilizadas para o estudo de séries, apresentando variabilidade quanto à adequação às séries históricas de variáveis climáticas (Ribeiro et al., 2007). Para Pruitt et al. (1972) e Marques Júnior (1995) destacam-se as distribuições Normal, Beta e Gumbel. Segundo Junqueira Júnior et al. (2007) as distribuições Gama e Log-Normal são as mais utilizadas, principalmente para a estimativa da precipitação. Segundo Fietz et al. (2005) as funções distribuição de probabilidade que melhor se ajustam aos dados de *DEF* são a Normal e a Log-normal. Para que haja minimização dos riscos, não se deve trabalhar com probabilidades de ocorrência inferiores a 75% ou 80%.

Além do estudo da distribuição de probabilidade de melhor ajuste à *DEF* e ao *EXC*, a análise das séries temporais dessas variáveis é de grande utilidade, principalmente quando se encontra algum tipo de tendência na decomposição das séries ao longo das estações e dos anos, obtendo-se padrões de movimento (Moraes et al., 2005). A identificação de padrões não aleatórios nas séries temporais também permite a previsão e simulação de eventos futuros (Sansigolo, 2008). Assim, a decomposição de séries temporais é utilizada para a determinação dos movimentos de tendência, ciclicidade e sazonalidade dentro da série.

Teve-se por objetivo, no presente trabalho, determinar os parâmetros estatísticos de cinco funções densidade de probabilidade (*fdp*) ajustadas aos valores decendiais de *DEF* e *EXC*, calcular a magnitude de sua ocorrência para os períodos de retornos de 4, 5, 10 e 15 anos, com a *fdp* de melhor ajuste, bem como realizar a decomposição temporal das séries de *DEF* e *EXC*, observando as possíveis influências das oscilações das duas variáveis sobre o plantio de *Pinus taeda*, no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Local de realização do trabalho**

As análises do presente trabalho foram realizadas para o município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná (Figura 4.1). A região está localizada no Segundo Planalto Paranaense e, segundo a classificação de Köppen, apresenta clima tipo Cfa/Cfb, subtropical úmido transicional para temperado propriamente dito, com temperatura média no mês mais frio inferior a 16°C, com ocorrência de geadas e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes (IAPAR, 2000).

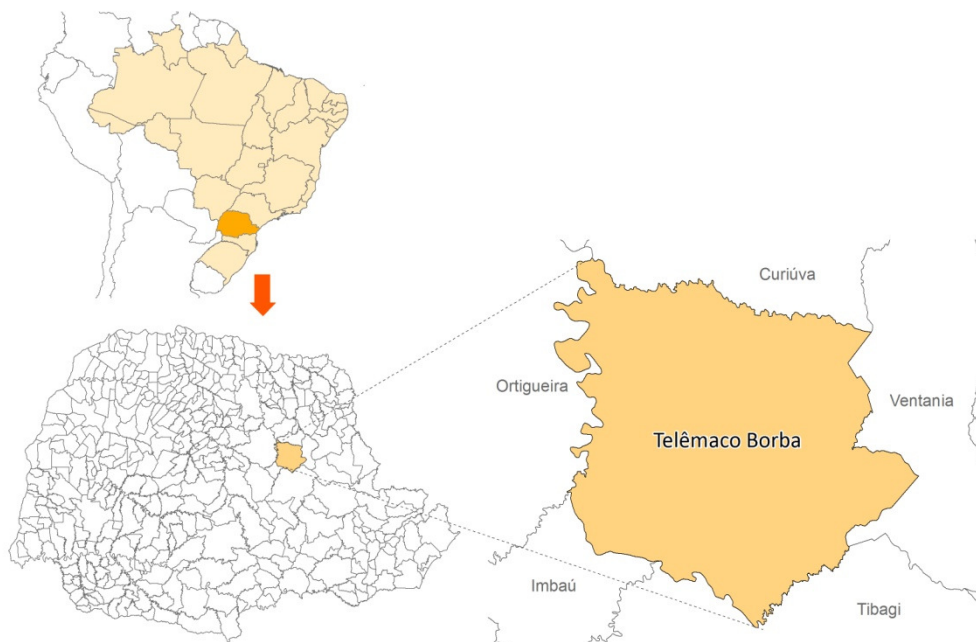


Figura 4.1 – Localização do município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná, onde se encontra a área de estudo.

## 2.2 Dados climáticos utilizados nas análises

Foram utilizados dados históricos diários (janeiro de 1981 a janeiro de 2011) provenientes de uma 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. Os dados necessários para o estudo foram: precipitação pluviométrica (mm), temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), umidade relativa média (%), radiação solar incidente acumulada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e velocidade do vento a dois metros de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ).

## 2.3 Estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ )

A estimativa da  $ET_o$  foi realizada com método de Penman-Monteith, parametrizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (Allen et al., 1998) (Apêndice 1).

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

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

#### 2.4 Modelo de balanço hídrico (BHA) utilizado nas análises

As simulações do *BHA* diário foram realizadas com auxílio de um programa computacional desenvolvido em linguagem de programação *Visual Basic Application (VBA - Macros)*, denominado “MORETTI – Módulo: Balanço hídrico seqüencial (periodicidade diária), versão 1.0” que utilizou dados de precipitação pluvial ( $P$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), armazenamento de água inicial do solo, coeficiente de cultivo do pinus ( $kc = 0,95$ ), capacidade de água disponível ( $CAD = 222,4 \text{ mm}$ ; Apêndice 3) e fração de água disponível ( $p = 0,7$ ), sendo esta última necessária para calcular a água disponível no solo ( $AD$ ) para a cultura do pinus (Souza, 2008).

#### 2.5 Organização dos dados de deficiência e excedente hídricos e estimativa de seus valores prováveis

Considerando as recomendações de Assis (1996) e Souza (2007) os procedimentos necessários para o cálculo da  $EXC$  e  $DEF$  decendial provável foram organizados e realizados com o auxílio de em uma planilha eletrônica, contendo rotinas desenvolvidas especialmente para essa finalidade, quais sejam:

- Tabulação dos dados diários de  $EXC$  e  $DEF$ , agrupamento dos dados em períodos de 10 dias (decêndios) e separação dos decêndios sem ocorrência de  $EXC$  e  $DEF$  daqueles contendo valores diferentes de zero. Para evitar inconsistências na estimativa dos parâmetros das  $fdp$ 's utilizadas, decêndios possuindo somatório de  $EXC$  e  $DEF$  inferior ao valor um ( $1 \text{ mm decêndio}^{-1}$ ) foram considerados iguais a zero;
- Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados das séries decendiais de  $EXC$  e  $DEF$ ;
- Cálculo dos parâmetros estatísticos das cinco  $fdp$ 's testadas (Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme) (Apêndice 2), com as séries de valores observados de  $EXC$  e  $DEF$

decendial. Os parâmetros encontrados foram: alfa e beta para a distribuição Gama; média e desvio padrão para a distribuição Normal; maior valor, menor valor e moda para a distribuição Triangular; média para a Exponencial; e, maior e menor valor para a distribuição Uniforme;

- Teste de aderência dos valores decendiais de *EXC* e *DEF* estimados, com as cinco *fdp*'s, e observados, com o teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de probabilidade;
- Após a escolha da *fdp* que melhor se ajustou aos valores decendiais de *EXC* e *DEF*, determinou-se a ocorrência de valores decendiais com 75% de probabilidade. Além disso, para o *EXC* foram determinados os valores prováveis à 25%, 20%, 10% e 7% de probabilidade de serem iguados ou superados, para os 37 decêndios ao longo do ano.
- Na estimativa dos valores prováveis de *EXC* e *DEF*, como algumas das *fdp*'s analisadas não admitem valores nulos, adotou-se a distribuição mista.

$$F(x) = X_o + (1 - X_o) \cdot D(x)$$

Sendo:  $F(x)$  – função cumulativa de probabilidade da distribuição mista (%);  $X_o$  – probabilidade de ocorrência de decêndios sem *EXC* ou *DEF* (%) - valores menores que  $1 \text{ mm} \cdot \text{decêndio}^{-1}$ ; e,  $D(x)$  – probabilidade estimada com a distribuição cumulativa teórica de melhor ajuste, em que seus parâmetros foram determinados na ausência de decêndios sem *EXC* ou *DEF* (%).

## 2.6 Decomposição das séries temporais de deficiência e excedente hídricos

Segundo Souza & Assis (1989) as séries temporais podem ser decompostas nos seguintes padrões: tendência, ciclicidade, sazonalidade e irregularidade. Para a obtenção da tendência foi utilizado o método das médias móveis, que considera como previsão para o período analisado a média das observações (Morettin, 1981). Foram calculadas médias móveis de ordem 3, 5 e 7, bem como as médias móveis centradas de ordem 3 e ponderada de ordem 7, para obter maior alisamento das séries analisadas e melhorar a visualização da tendência. O método dos Mínimos Quadrados também foi utilizado para a obtenção da equação de regressão linear e seu respectivo coeficiente de determinação.

Os movimentos sazonais, cíclicos e irregulares foram obtidos pelo modelo multiplicativo de decomposição de séries temporais. A sazonalidade foi representada pelos índices sazonais (*IS*) obtidos com o método da razão para a média móvel, também conhecido

como método da média móvel percentual. As variações cíclicas e irregulares foram avaliadas em conjunto e obtidas pela remoção da componente tendência.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Deficiência e excedentes hídricos prováveis

Os valores mensais de *EXC* foram superiores aos de *DEF* em todos os anos analisados, evidenciando a influência dos totais de chuva que ocorreram na região, já que na maioria dos anos analisados o total precipitado foi superior a *ET<sub>o</sub>* (Figura 4.2, Tabela 4.2 e Tabela 4.3). Além disso, o município localiza-se em uma região de grande altitude, o que tende a reduzir a demanda evapotranspirativa e, conseqüentemente, tem-se menores valores de *DEF* e maiores valores de *EXC* (Souza et al., 2006).

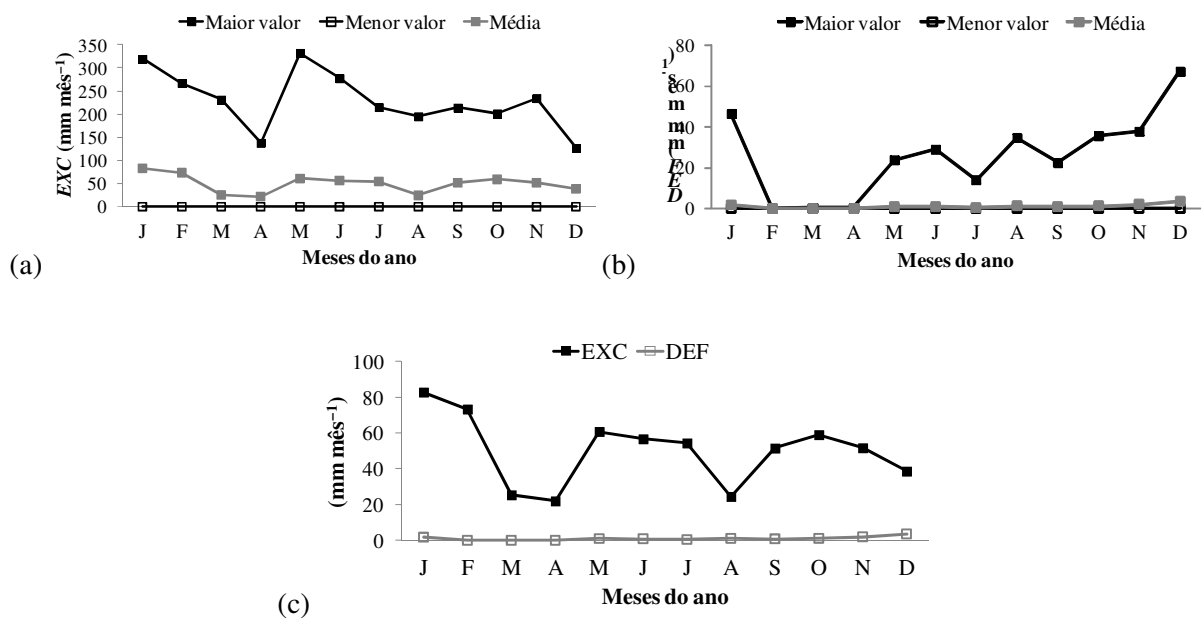


Figura 4.2 – Maiores e menores valores médios mensais de (a) *EXC* (b) *DEF* e (c) média mensal da *DEF* e *EXC* para um período de 31 anos no município de Telêmaco Borba – PR.

Dedecek et al. (2008) comenta que os maiores teores de água no solo favorecem o incremento do crescimento de árvores de *Pinus taeda*. Para Castro et al. (2010) o nível de deficiência hídrica aceitável para regiões aptas ao plantio de *Pinus taeda* é de, no máximo, 50 mm ano<sup>-1</sup>. Nas análises realizadas no presente trabalho, considerando a *CAD* de 222,4 mm, a *DEF* média anual foi de 12,7 mm ano<sup>-1</sup>. Observou-se ao longo dos anos analisados que tanto a *DEF* (*CV* = 131,8) quanto o *EXC* (*CV* = 130,1) apresentaram grande variação, caracterizada pelos coeficientes de variação anual (Tabela 4.1).



Tabela 4.1. Medidas de tendência e dispersão dos valores anuais de deficiência (*DEF*) e excedente (*EXC*) hídrico para a cultura do pinus, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

Anos	<i>DEF</i> ----- (mm ano <sup>-1</sup> ) -----	$\sigma^*$	<i>CV</i> ** (%)	<i>EXC</i> ----- (mm ano <sup>-1</sup> ) -----	$\sigma^*$	<i>CV</i> ** (%)
1981	22,4	6,5	346	328,1	51	185
1982	0,0	0,0	33	789,7	70	106
1983	0,0	0,0	35	1143,5	108	112
1984	0,0	0,0	35	531,9	34	75
1985	11,9	3,4	346	361,2	49	158
1986	46,4	13,4	346	674,5	87	130
1987	0,0	0,0	33	638,4	90	169
1988	129,8	21,2	196	271,5	49	217
1989	0,0	0,0	35	847,4	92	131
1990	0,0	0,0	31	796,5	74	111
1991	2,8	0,8	346	220,6	26	140
1992	0,0	0,0	37	867,3	88	122
1993	0,0	0,0	40	495,3	58	141
1994	0,0	0,0	38	506,3	38	91
1995	0,0	0,0	56	493,0	39	95
1996	0,0	0,0	46	432,1	34	95
1997	3,7	1,1	346	928,4	86	112
1998	3,7	0,0	72	519,4	35	81
1999	68,2	13,4	235	422,5	39	112
2000	3,7	1,1	346	447,7	50	134
2001	0,0	0,0	21	702,2	43	73
2002	0,0	0,0	33	513,2	51	120
2003	0,0	0,0	23	521,2	59	135
2004	0,0	0,0	38	649,0	65	120
2005	0,4	0,1	299	339,9	51	181
2006	103,5	13,1	152	169,8	37	262
2007	0,0	0,0	33	395,8	47	143
2008	1,1	0,3	346	491,4	59	143
2009	0,0	0,0	31	854,2	90	127
2010	0,0	0,0	23	582,3	54	112
2011	0,0	0,0	87	863,7	71	99
Média	12,7	2,4	131,8	574,1	58,9	130,1

\*Desvio padrão; \*\* Coeficiente de variação.

Tabela 4.2. Medidas de tendência e dispersão dos valores mensais de deficiência hídrica (*DEF*) para a cultura do pinus, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

Meses	Média	Maior valor	Menor valor	$\sigma^*$	CV**
	----- (mm mês <sup>-1</sup> ) -----				
Janeiro	1,7	46	0	8,32	4,8
Fevereiro	0,0	0	0	0,00	0,5
Março	0,0	0	0	0,06	4,8
Abril	0,0	0	0	0,10	3,9
Mai	0,9	24	0	4,31	4,9
Junho	0,9	29	0	5,20	5,6
Julho	0,4	14	0	2,49	5,6
Agosto	1,1	34	0	6,19	5,6
Setembro	0,9	22	0	4,06	4,8
Outubro	1,2	36	0	6,42	5,6
Novembro	2,0	38	0	7,87	4,0
Dezembro	3,6	67	0	13,14	3,7

\*Desvio padrão; \*\* Coeficiente de variação.

Tabela 4.3. Medidas de tendência e dispersão dos valores mensais de excedente hídrico (*EXC*) para a cultura do pinus, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

Meses	Média	Maior valor	Menor valor	$\sigma^*$	CV**
	----- (mm mês <sup>-1</sup> ) -----				
Janeiro	79,1	319	0	82,76	1,0
Fevereiro	73,2	267	0	77,26	1,1
Março	30,0	231	0	54,41	1,8
Abril	25,2	138	0	34,87	1,4
Mai	65,6	332	0	94,72	1,4
Junho	51,5	277	0	61,95	1,2
Julho	50,1	215	0	51,49	1,0
Agosto	24,1	195	0	43,87	1,8
Setembro	49,7	214	0	61,05	1,2
Outubro	52,8	201	0	54,92	1,0
Novembro	42,2	234	0	50,93	1,2
Dezembro	35,8	127	0	40,61	1,1

\*Desvio padrão; \*\* Coeficiente de variação.

A distribuição dos dados de deficiência e excedente hídrico assemelha-se à distribuição dos dados de precipitação, mas, devido à frequência de valores próximos ou iguais a zero, a distribuição dos dados de deficiência hídrica é mais semelhante à distribuição

lognormal ou exponencial (Silva et al., 2008); enquanto que os dados de precipitação apresentam melhor ajustamento à distribuição Gama (Sampaio et al., 2007). Para o excedente hídrico, a maioria dos coeficientes de variação foram superiores a 50%, o que determinou grande variabilidade dos dados ao longo dos meses. Dentre as cinco *fdp* testadas, a distribuição Gama ajustou-se a 48% dos valores decendiais de *EXC*, sendo a melhor distribuição avaliada (Tabela 4.4). Cerca de 35% dos decêndios adequaram-se à distribuição Exponencial e 16% ajustaram-se à distribuição Normal. Em trabalho semelhante Viana et al. (2005) também encontraram melhor ajuste dos valores mensais de *DEF* e *EXC* à distribuição Gama.

Os valores prováveis de  $EXC_{75\%}$  (Tabela 4.4) evidenciaram que, considerando um período de retorno de 1,33 anos, não ocorreram excedentes hídricos nos decêndios ao longo dos anos analisados. Assim, a partir das análises que determinaram a *fdp* que melhor se ajustou aos dados de *EXC* foram calculados os valores de excedente hídrico (*EXC*) para os períodos de retorno 4, 5, 10 e 15 anos (Tabela 4.5). Os valores prováveis de *EXC* auxiliam no planejamento agrícola e dimensionamento de uma série de obras na área de engenharia rural.

Alguns decêndios do ano não apresentaram qualquer tipo de ajuste entre os dados de *DEF* e as distribuições de probabilidade testadas. Embora a série tenha 31 anos, a ocorrência de valores nulos de *DEF*, em alguns períodos, pode ter prejudicado a obtenção do ajuste (Tabela 4.6). Entretanto, para uma pequena parte dos decêndios os valores de *DEF* ajustaram-se às distribuições Gama (11%) e Exponencial (5,4%). Considerando os decêndios que obtiveram ajuste, verificou-se que os valores de  $DEF_{75\%}$  foram iguais a zero, o que evidenciou baixo risco e excelentes condições para o cultivo do pinus (Castro et al., 2010).

Tabela 4.4. Parâmetros estatísticos de cinco *fdp*'s (N - Normal, T - Triangular, G - Gama, E - Exponencial e U - Uniforme) e valores prováveis decendiais da *EXC* ( $EXC_{75\%}$ ), para os 37 decêndios do ano, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

----- Série -----		----- Parâmetros das <i>fdp</i> 's -----							<i>EXC</i> <sub>75%</sub>	P( <i>EXC</i> =0)	
Decêndios	Anos	Menor Valor	Maior Valor	$\mu^*$	$\sigma^*$	Moda	Alfa	Beta	<i>fdp</i> **	(mm decêndio <sup>-1</sup> )	(%)
1 (01/01 a 10/01)	31	8,71	163,77	50,43	48,43	8,71	1,41	35,74	E	0,0	56,3
2 (11/01 a 20/01)	31	0,53	110,40	45,68	36,97	41,73	1,14	39,95	G	0,0	46,9
3 (21/01 a 30/01)	31	1,89	189,79	64,08	57,89	48,86	1,32	48,68	E	0,0	50,0
4 (31/02 a 09/02)	31	0,55	138,22	41,22	42,32	34,97	0,81	51,12	E	0,0	40,6
5 (10/02 a 19/02)	31	8,03	108,04	40,07	25,79	45,54	2,52	15,88	N	0,0	37,5
6 (20/02 a 01/03)	31	16,80	86,19	43,14	23,26	25,48	3,72	11,61	G	0,0	37,5
7 (02/03 a 11/03)	31	2,07	67,93	23,92	22,22	2,07	1,02	23,48	E	0,0	71,9
8 (12/03 a 21/03)	31	12,40	114,03	47,86	40,31	12,40	1,69	28,30	E	0,0	78,1
9 (22/03 a 31/03)	31	0,73	120,21	46,58	49,86	15,66	0,74	62,77	G	0,0	71,9
10 (01/04 a 10/04)	31	0,63	28,55	13,76	10,55	28,55	0,74	62,77	—	—	68,8
11 (11/04 a 20/04)	31	0,64	43,59	22,59	15,84	27,48	0,97	23,26	N	0,0	56,3
12 (21/04 a 30/04)	31	5,43	98,77	32,50	33,38	17,10	1,23	26,38	E	0,0	65,6
13 (01/05 a 10/05)	31	4,73	101,71	41,97	32,88	4,73	1,47	28,61	N	0,0	62,5
14 (11/05 a 20/05)	31	2,40	149,68	53,60	48,32	20,81	1,11	48,12	G	0,0	56,3
15 (21/05 a 30/05)	31	15,95	190,62	72,95	56,70	37,79	2,06	35,35	G	0,0	62,5
16 (31/05 a 09/06)	31	3,51	164,71	35,75	39,75	23,66	1,34	26,63	G	0,0	50,0
17 (10/06 a 19/06)	31	3,30	89,03	35,38	28,18	24,74	1,58	22,39	G	0,0	56,3
18 (20/06 a 29/06)	31	0,00	147,82	39,74	38,03	36,95	1,11	35,84	G	0,0	46,9
19 (30/06 a 09/07)	31	5,98	111,18	44,38	30,55	32,28	2,22	20,02	G	0,0	53,1
20 (10/07 a 19/07)	31	4,94	100,51	34,43	28,43	16,88	1,81	19,00	G	0,0	50,0
21 (20/07 a 29/07)	31	1,97	100,57	33,35	25,57	26,62	1,63	20,51	G	0,0	53,1
22 (30/07 a 08/08)	31	0,81	53,87	16,10	17,78	0,81	0,82	19,60	E	0,0	62,5
23 (09/08 a 18/08)	31	8,05	141,17	40,93	50,40	8,05	1,17	35,04	E	0,0	78,1
24 (19/08 a 28/08)	31	2,69	80,34	29,69	26,43	41,52	1,06	28,11	N	0,0	68,8
25 (29/08 a 07/09)	31	4,16	103,60	35,17	34,81	29,02	1,10	31,97	E	0,0	71,9
26 (08/09 a 17/09)	31	10,14	95,33	47,39	29,11	31,44	2,58	18,35	G	0,0	62,5
27 (18/09 a 27/09)	31	3,65	118,10	45,36	36,34	32,26	1,36	33,24	G	0,0	53,1
28 (28/09 a 07/10)	31	3,54	99,76	40,07	28,42	27,59	1,73	23,12	G	0,0	53,1
29 (08/10 a 17/10)	31	3,16	119,17	35,34	32,29	3,16	1,18	30,06	N	0,0	46,9
30 (18/10 a 27/10)	31	2,79	103,09	33,67	32,42	27,86	1,30	25,91	G	0,0	46,9
31 (28/10 a 06/11)	31	3,22	57,93	24,06	19,65	16,89	1,48	16,27	G	0,0	62,5
32 (07/11 a 16/11)	31	2,75	97,46	28,35	25,55	26,43	1,60	17,69	E	0,0	50,0
33 (17/11 a 26/11)	31	1,90	87,78	29,04	28,07	23,37	1,05	27,76	E	0,0	53,1
34 (27/11 a 06/12)	31	5,17	138,41	36,61	39,76	5,17	1,31	27,94	E	0,0	50,0
35 (07/12 a 16/12)	31	2,04	46,48	24,24	13,34	35,37	2,27	10,69	N	0,0	53,1
36 (17/12 a 26/12)	31	2,39	94,67	32,09	28,67	2,39	1,09	29,54	G	0,0	53,1
37 (27/12 a 31/12)	31	3,37	70,97	19,43	20,30	20,27	1,44	13,54	E	0,0	87,5

\* média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) dos valores decendiais da série; \*\* função densidade de probabilidade que melhor se ajustou aos dados decendiais da série.

Tabela 4.5. Valores prováveis decendiais de  $EXC_{25\%}$ ,  $EXC_{20\%}$ ,  $EXC_{10\%}$  e  $EXC_{7\%}$  para os 37 decêndios do ano, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

----- Série -----		<i>fdp</i>	$EXC_{25\%}$	$EXC_{20\%}$	$EXC_{10\%}$	$EXC_{7\%}$
Decêndios	Anos					
1 (01/01 a 10/01)	31	E	28,2	39,5	74,4	92,4
2 (11/01 a 20/01)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
3 (21/01 a 30/01)	31	E	44,4	58,7	103,1	126,0
4 (31/02 a 09/02)	31	E	35,7	44,9	73,4	88,1
5 (10/02 a 19/02)	31	N	—	—	—	—
6 (20/02 a 01/03)	31	G	45,0	50,1	64,4	71,1
7 (02/03 a 11/03)	31	E	2,8	8,2	24,7	33,3
8 (12/03 a 21/03)	31	E	-	4,3	37,5	54,5
9 (22/03 a 31/03)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
10 (01/04 a 10/04)	31	—	—	—	—	-
11 (11/04 a 20/04)	31	N	—	—	34,4	38,3
12 (21/04 a 30/04)	31	E	10,3	17,6	40,1	51,7
13 (01/05 a 10/05)	31	N	—	—	62,5	71,2
14 (11/05 a 20/05)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
15 (21/05 a 30/05)	31	G	43,9	57,8	94,8	112,1
16 (31/05 a 09/06)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
17 (10/06 a 19/06)	31	G	24,1	31,0	50,8	60,4
18 (20/06 a 29/06)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
19 (30/06 a 09/07)	31	G	—	-0,5	-0,5	-0,5
20 (10/07 a 19/07)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
21 (20/07 a 29/07)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
22 (30/07 a 08/08)	31	E	6,5	10,1	21,3	27,0
23 (09/08 a 18/08)	31	E	—	3,7	32,0	46,6
24 (19/08 a 28/08)	31	N	—	—	—	—
25 (29/08 a 07/09)	31	E	4,1	12,0	36,4	48,9
26 (08/09 a 17/09)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
27 (18/09 a 27/09)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
28 (28/09 a 07/10)	31	G	30,5	30,5	59,1	69,4
29 (08/10 a 17/10)	31	N	37,7	45,5	63,9	71,4
30 (18/10 a 27/10)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
31 (28/10 a 06/11)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
32 (07/11 a 16/11)	31	E	19,7	26,0	45,6	55,7
33 (17/11 a 26/11)	31	E	18,3	24,7	44,9	55,2
34 (27/11 a 06/12)	31	E	25,4	33,5	58,9	72,0
35 (07/12 a 16/12)	31	N	—	—	—	—
36 (17/12 a 26/12)	31	G	0,0	0,0	0,0	0,0
37 (27/12 a 31/12)	31	E	—	—	4,3	11,3

Tabela 4.6. Parâmetros estatísticos de cinco *fdp*'s (N – Normal, T - Triangular, G - Gama, E - Exponencial e U - Uniforme) e valores prováveis decendiais da *DEF* ( $DEF_{75\%}$ ), para os 37 decêndios do ano, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

----- Série -----		----- Parâmetros das <i>fdp</i> 's -----							<i>fdp</i> **	<i>DEF</i> <sub>75%</sub> (mm decêndio <sup>-1</sup> )	P( <i>DEF</i> =0) %
Decêndios	Anos	Menor Valor	Maior Valor	$\mu^*$	$\sigma^*$	Moda	Alfa	Beta			
1 (01/01 a 10/01)	31	0,18	17,31	8,74	12,12	17,31	—	—	—	—	90,6
2 (11/01 a 20/01)	31	0,22	28,92	7,89	14,03	0,22	0,45	17,39	G	0	87,5
3 (21/01 a 30/01)	31	0,09	3,34	1,30	1,54	0,09	0,66	1,98	G	0	87,5
4 (31/02 a 09/02)	31	0,19	5,82	3,01	3,98	5,82	—	—	—	—	96,9
5 (10/02 a 19/02)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	96,9
6 (20/02 a 01/03)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	96,9
7 (02/03 a 11/03)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	96,9
8 (12/03 a 21/03)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
9 (22/03 a 31/03)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
10 (01/04 a 10/04)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
11 (11/04 a 20/04)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	96,9
12 (21/04 a 30/04)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
13 (01/05 a 10/05)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	90,6
14 (11/05 a 20/05)	31	0,20	9,94	4,43	5,00	9,94	—	—	—	—	87,5
15 (21/05 a 30/05)	31	0,38	6,83	3,60	4,56	6,83	—	—	—	—	90,6
16 (31/05 a 09/06)	31	1,50	10,39	5,94	6,28	10,39	—	—	—	—	90,6
17 (10/06 a 19/06)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
18 (20/06 a 29/06)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
19 (30/06 a 09/07)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
20 (10/07 a 19/07)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
21 (20/07 a 29/07)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
22 (30/07 a 08/08)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
23 (09/08 a 18/08)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
24 (19/08 a 28/08)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
25 (29/08 a 07/09)	31	0,25	3,37	1,81	2,21	3,37	—	—	—	—	90,6
26 (08/09 a 17/09)	31	0,31	12,11	3,99	5,56	0,31	0,65	6,12	G	0	84,4
27 (18/09 a 27/09)	31	0,01	6,42	3,22	4,53	6,42	—	—	—	—	90,6
28 (28/09 a 07/10)	31	1,11	4,59	3,12	1,80	4,59	—	—	—	—	87,5
29 (08/10 a 17/10)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
30 (18/10 a 27/10)	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93,8
31 (28/10 a 06/11)	31	0,12	0,65	0,39	0,38	0,65	—	—	—	—	90,6
32 (07/11 a 16/11)	31	0,69	2,36	1,52	1,18	2,36	—	—	—	—	90,6
33 (17/11 a 26/11)	31	9,46	18,37	13,91	6,31	18,37	—	—	—	—	90,6
34 (27/11 a 06/12)	31	25,67	31,64	28,65	4,22	31,64	—	—	—	—	90,6
35 (07/12 a 16/12)	31	3,41	34,26	14,03	17,53	3,41	1,04	13,52	E	0	87,5
36 (17/12 a 26/12)	31	0,55	20,30	8,14	8,99	0,55	0,82	9,92	G	0	84,4
37 (27/12 a 31/12)	31	0,56	6,25	2,69	3,10	0,56	1,15	2,33	E	0,7	87,5

\* média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) dos valores decendiais da série. \*\* função densidade de probabilidade que melhor se ajustou aos dados decendiais da série.

### 3.2 Decomposição das séries de deficiência e excedente hídricos

A série de *DEF* não apresentou tendência de crescimento ou decréscimo ( $R^2 = 0,004$ ) (Figura 4.3). No entanto, baseando-se apenas nos valores absolutos, pôde-se observar ao longo de 31 anos um aumento na *DEF* de 0,534 mm. O ano com maior deficiência hídrica foi o de 1988 (129,8 mm ano<sup>-1</sup>).

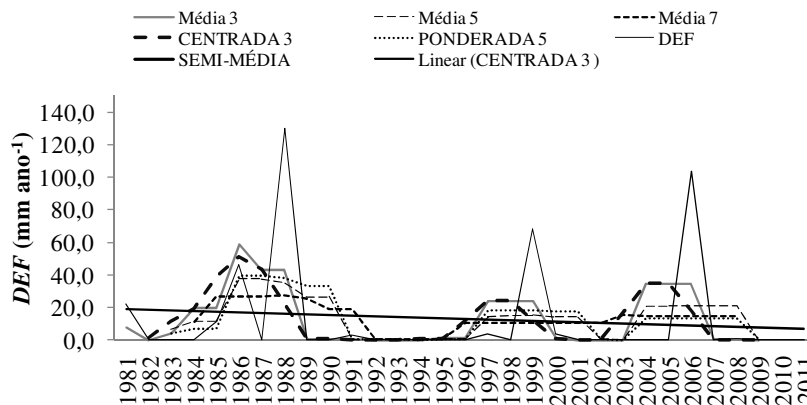


Figura 4.3 – Deficiência hídrica (*DEF*) para cultura do pinus, estimada para uma série de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR: médias móveis de 3, 5 e 7 períodos, centrada de 3 períodos e ponderada de 5 períodos.

Apesar de ter apresentado leve decréscimo ao longo dos anos, o excedente hídrico também não apresentou estatisticamente tendência de crescimento ou decréscimo ( $R^2 = 0,036$ ) (Figura 4.4). O maior valor de *EXC* ocorreu no ano de 1983 (1143,5 mm ano<sup>-1</sup>), e o menor valor ocorrido ao longo dos anos analisados foi de 169,8 mm ano<sup>-1</sup>; valor superior ao maior valor de *DEF* encontrado para o mesmo período.

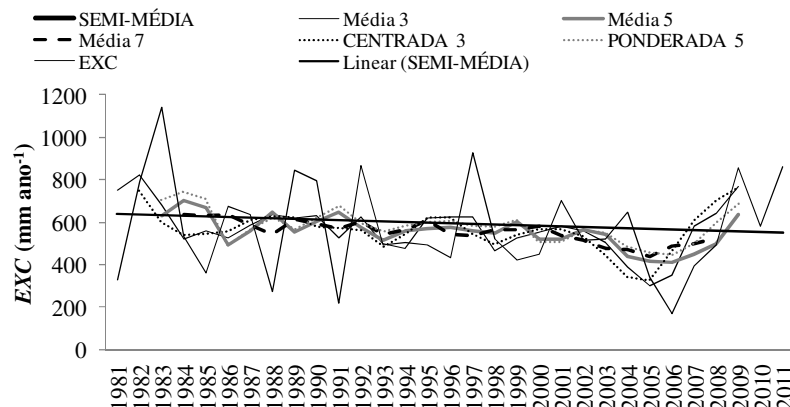


Figura 4.4 – Excedente hídrico (*EXC*), estimada para cultura do pinus, para uma série de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR: médias móveis de 3, 5 e 7 períodos, centrada de 3 períodos e ponderada de 5 períodos.

A partir da remoção dos movimentos sazonais das séries de *DEF* (Figura 4.5) e *EXC* (Figura 4.6) observou-se que as duas componentes foram pouco influenciadas pela sazonalidade, já que sofreram influência da precipitação (*P*), que também não apresenta sazonalidade (Sampaio et al., 2007). A sazonalidade explicou apenas 1,3% da variação da *DEF* e 6,5% da variação do *EXC* ao longo dos meses do ano (Figura 4.7).

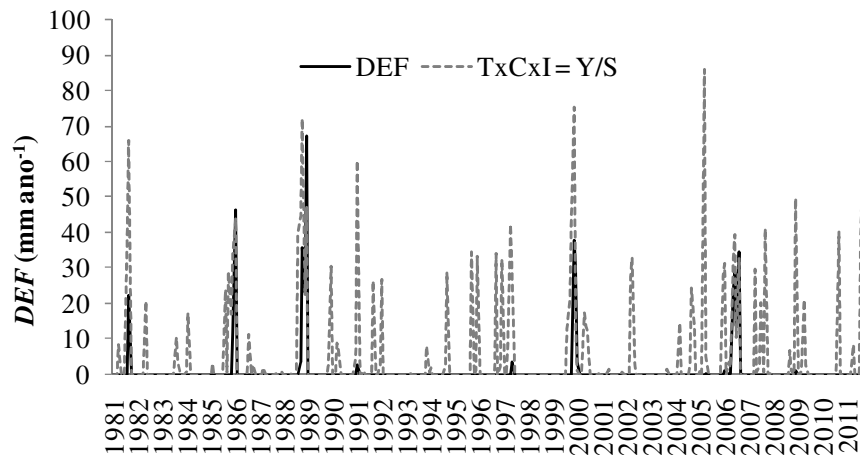


Figura 4.5 – Série de *DEF*, após remoção dos movimentos sazonais, para uma série de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

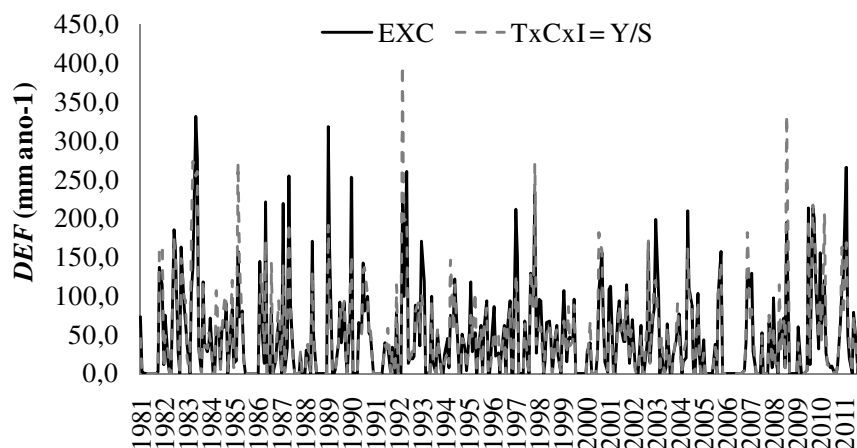


Figura 4.6 – Série de *EXC*, após remoção dos movimentos sazonais, para uma série de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.



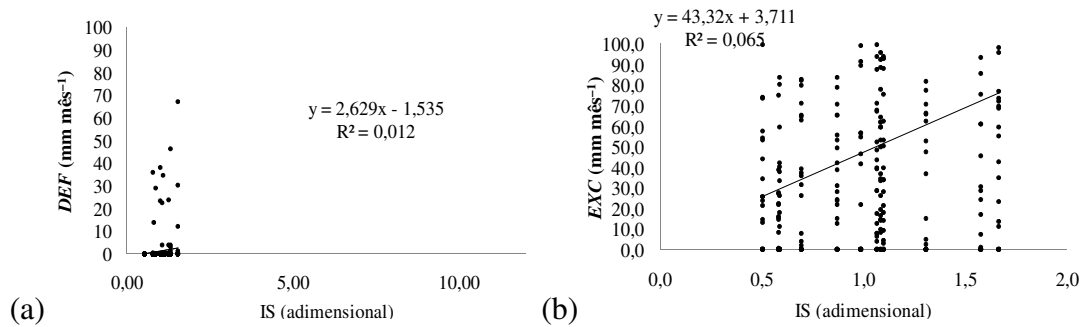


Figura 4.7 – Regressão linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtidos entre os valores mensais de: (a) *EXC* e índices de sazonalidade (*IS*); e, (b) *DEF* e índices de sazonalidade (*IS*) para uma série de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

A ocorrência da ciclicidade e irregularidade nas séries de *DEF* e *EXC* foi obtida pela análise dos índices cíclicos e irregulares (*ICI*) (Figura 4.8). Assim, quando os índices aproximaram-se de um, ocorreu menor influência dos movimentos sobre as séries de *DEF* e *EXC* (Morettin, 1981). A ciclicidade teve grande influência sobre a *DEF* ( $R^2 = 0,99$ ) e *EXC* ( $R^2 = 0,96$ ), o que pode ser explicado pela influência da precipitação sobre as séries, principalmente no caso da *DEF* (Figura 4.9).

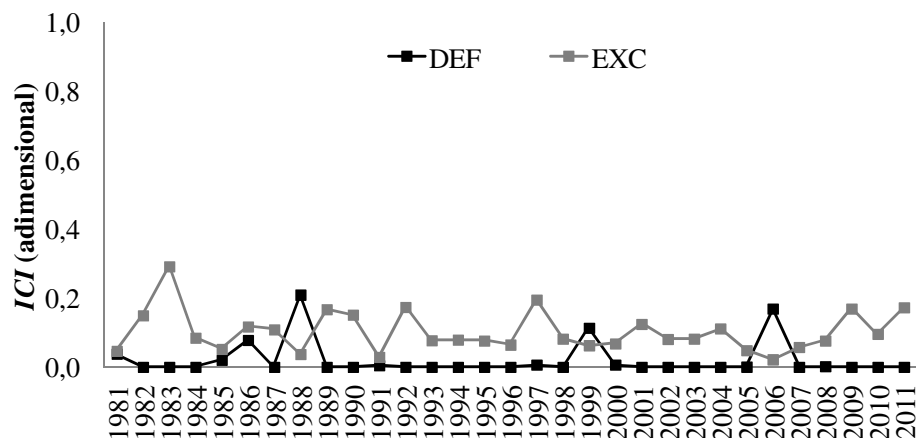


Figura 4.8 – Índices cíclicos e irregulares obtidos para a série de *EXC* e *DEF*, para um período de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

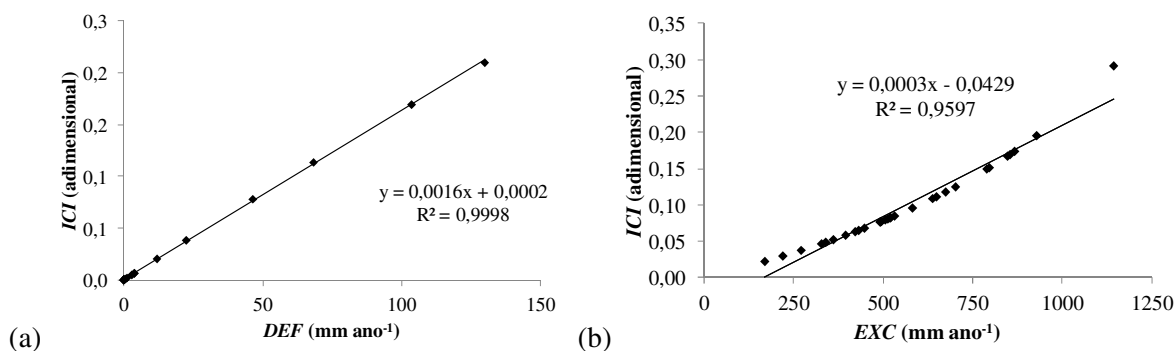


Figura 4.9 – Regressão linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtidos entre os valores mensais de: (a)  $DEF$  e índices cíclicos e irregulares ( $ICI$ ); e, (b)  $EXC$  e índices cíclicos e irregulares ( $ICI$ ), para uma série de 31 anos, no município de Telêmaco Borba – PR.

#### 4. CONCLUSÕES

- A *fdp* Gama foi a que apresentou melhor ajuste às séries de  $DEF$  e  $EXC$ .
- As séries anuais de  $DEF$  e  $EXC$  não apresentaram tendência significativa de acréscimo ou decréscimo.
- A sazonalidade teve pouca influência sobre a  $DEF$  e  $EXC$ .
- A ciclicidade teve grande influência sobre a  $DEF$  e  $EXC$  devido à influência da  $P$  sobre essas variáveis.

#### 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.

ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V. DE & PEREIRA, A.R. Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática. Pelotas: Ed. Universitária UFPel, 1996. 161p.

ÁVILA, L.F.; MELLO, C.R. & VIOLA, M.R. Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 13:906–915, 2009.

CASTRO, F.S.; PEZZOPANE, J.; PEZZOPANE, J.; CECÍLIO, R. & XAVIER, A. Zoneamento agroclimático para espécies do gênero *Pinus* no Estado do Espírito Santo. Floresta, 40:235–250, 2010.

DEDECEK, R.A.; FIER, I.S.N.; SPELTZ, R. & LIMA, L.C.S. Influência do sítio no desenvolvimento do *Pinus taeda* aos 22 anos: 1.características físico-hídricas e químicas do solo. Revista Floresta, 38:507–516, 2008.

DOLDAN, M.E.Q. Desenvolvimento da altura dominante de *Pinus taeda* L. como resposta aos estímulos dos fatores do meio, na região de Ponta Grossa. Revista Floresta, 20:54–55, 1990.

FIETZ, C.R.; URCHEI, M.A. & FRIZZONE, J.A. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico na região de Dourados, MS. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 5:558–562, 2005.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Cartas Climáticas do Estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 2000. 1v. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em 03 de setembro de 2012.

JUNQUEIRA JUNIOR, J.A.; GOMES, N.M.; MELLO, C.R. & SILVA, A.M. Precipitação provável para a região de Madre de Deus, Alto Rio Grande: modelos de probabilidades e valores característicos. Ciência e Agrotecnologia., Lavras, 31:842–850, 2007.

MAAYAR, M.E.; PRICE, D.T. & CHEN, J.M. Simulating daily, monthly and annual water balances in a land surface model using alternative root water uptake schemes. Advances in Water Resources, 32:1444–1459, 2009.

MARQUES Jr, S.; SAAD, J.C.C. & MOURA, M.V.T. Modelo iterativo para estimativa da evapotranspiração de referencia provável. Sci. Agric., Piracicaba, 52:221–225, 1995.

MORAES, B.C.; COSTA, J.M.N. & COSTA, A.C.L. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. Acta Amazônica, 35:207–214, 2005.

MORETTIN, P.A. & TOLOI, C.M.C. Modelo para Previsão de Séries Temporais. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada, v.1, 1981.

PRUITT, W.O.; OETTINGEN, S.V. & MORGAN, D.L. Central California vapotranspiration frequencies. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 98:177–184, 1972.

RIBEIRO, B.T.; AVANZI, J.C.; MELLO, C.R.; LIMA, J.M. & SILVA, M.L.N. Comparação de distribuições de probabilidade e estimativa da precipitação provável para a região de Barbacena, MG. Ciênc. agrotec., Lavras, 31:1297–1302, 2007.

ROSA, H.; MARTINS, S.S. & SILVA, O.H. Atividade florestal nos municípios de Telêmaco Borba, Ortigueira, Reserva, Imbaú e Tibagi: caracterização e perspectivas do setor. Acta Scientiarum Agronomy, 28:41–45, 2006.

SAMPAIO, S.C.; QUEIROZ, M.M.F.; FRIGO, E.P.; LONGO, A.J. & SUSZEK, M. Estimativa e distribuição de precipitações decendiais para o Estado do Paraná. Irriga, 12:38–53, 2007.

SANDS, R. & MULLIGAN, D. R. Water and Nutrient Dynamics and Tree Growth. Forest Ecology and Management, Amsterdã, 30:91–111, 1990.

SANSIGOLO, C.A. Distribuições de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, 23:341–346, 2008.

SILVA, J.C.; HELDWEIN, A.B.; TRENTIN, B. STRECK, N.A. & MARTINS, F.B. Funções de distribuição de probabilidade decendial e mensal para a deficiência hídrica no solo. *Ciência Rural*,38:1893–1899, 2008.

SOUZA, E.R. & ASSIS, S.G. Violência e mortalidade na América Latina: um estudo das causas externas de 1968 a 1986. Rio de Janeiro: Centro Latino Americano de Estudos sobre Violência e Saúde, Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, 1989.

SOUZA, M.J.H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H.G.; LEITE, F.P. & MINUZZI, R.B. Análise comparativa entre precipitação e produtividade florestal em duas localidades da bacia do rio Doce, Minas Gerais. *Revista Árvore*, 30:399–410, 2006.

SOUZA, J.L.M. de Programa *MORETTI* – Módulo: Estimativa da série diária e decendial da evapotranspiração de referencia (*ET<sub>o</sub>*) com o método THORNTHWAITE (1948). Versão 1.0, 2007.

SOUZA, J.L.M. Programa *MORETTI* – Módulo: Balanço hídrico seqüencial (periodicidade: 1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias). Versão 1.0. Curitiba, DSEA/SCA/UFPR, 2008 (Programa computacional).

VIANA, T.V.A.; CRISÓSTOMO JUNIOR, R.R.; MOREIRA, L.G.; AZEVEDO, B.M. & VIANA, S.S.A. Análise estocástica dos déficits e dos excedentes hídricos mensais em Fortaleza, CE. *Revista Ciência Agronômica*, 36:391–395, 2005.

VOSE, J. M. & SWANK, W.T. Effect of long-term drought on the hydrology and growth of a white pine plantation in the southern Appalachians. *Forest Ecology and Management*, 64:25–39, 1994.

## CONCLUSÃO GERAL

As equações de Angström-Prescott e Hargreaves & Samani, empregando-se os coeficientes ajustados, podem ser utilizadas com confiança para estimar valores de  $R_s$  na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

As  $fdp$ 's que apresentaram melhor ajuste aos valores decendiais de  $ET_o$  e  $P$  foram a Normal e Gama, respectivamente. As séries anuais de  $P$  e  $ET_o$  não apresentaram tendência significativa de acréscimo ou decréscimo, e foram influenciadas pelos movimentos sazonais, cíclicos e irregulares. A sazonalidade teve pouca influência sobre a  $P$ , mas exerceu grande influência sobre a  $ET_o$ .

Mediante as avaliações testadas, as condições hídricas do solo propiciam satisfatoriamente o cultivo de Pinus no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. O armazenamento médio mensal de água no solo ao longo do ano foi fortemente influenciado pela ciclicidade e irregularidade da  $P$ .

A  $fdp$  Gama foi a que apresentou melhor ajuste às séries de  $DEF$  e  $EXC$ . As séries anuais de  $DEF$  e  $EXC$  não apresentam tendência significativa de acréscimo ou decréscimo. A sazonalidade teve pouca influência sobre a  $DEF$  e  $EXC$ , mas a ciclicidade teve grande influência, principalmente da precipitação ( $P$ ) sobre a  $DEF$ .

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo a proporcionar melhorias no que diz respeito ao zoneamento agroclimático para a cultura do Pinus, para a realização das análises de  $BHA$ , recomenda-se a realização de testes e calibração de outros valores de  $kc$ , fração  $p$  e  $CAD$ , de modo a contemplar outros solos e regiões.

O estudo da distribuição das componentes hídricas é importante para o entendimento e determinação de períodos críticos de deficiência ou excedente hídricos para a cultura do Pinus. Assim, deve ser incentivada a continuidade de estudos que visem o ajustamento de funções densidade de probabilidade às variáveis de entrada e saída de um  $BHA$ . Ainda, recomenda-se a utilização de outros níveis de probabilidade e, conseqüentemente, diferentes períodos de retorno para o estudo da distribuição dos parâmetros do  $BHA$ , o que tende a favorecer a caracterização mais detalhada da ocorrência das condições de deficiência e excedente hídricos. E, de modo a definir a interferência dos movimentos sazonais, cíclicos e

aleatórios sobre o *BHA*, recomenda-se a realização da simulação dos *BHA*'s considerando as séries de precipitação e evapotranspiração de referência decompostas.

**APÊNDICE 1 – PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DO MÉTODO DE PENMAN-  
MONTEITH**

## 1 Estimativa da $ET_o$ (mm dia<sup>-1</sup>) com o método de Penman-Monteith

A estimativa da  $ET_o$  (mm dia<sup>-1</sup>) 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<sup>-1</sup>);  $\Delta$  – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C<sup>-1</sup>);  $R_n$  – radiação líquida na superfície (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);  $G$  – balanço do fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);  $\gamma_{psy}$  – constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>);  $T$  – temperatura média do ar (°C);  $u_2$  – velocidade do vento a dois metros de altura (m s<sup>-1</sup>);  $e_s$  – pressão de saturação de vapor (kPa);  $e_a$  – pressão atual do vapor (kPa).

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

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

Sendo:  $\gamma_{psy}$  – constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>);  $a_{psy}$  – coeficiente dependente do tipo de ventilação do bulbo úmido ( $a_{psy} = 0,0008$  °C<sup>-1</sup> 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:

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

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 ( $\Delta$ ) foi obtida por meio da seguinte relação:

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

Sendo:  $\Delta$  – declinação da curva de pressão de saturação do vapor (kPa °C<sup>-1</sup>);  $e^o(T_{med})$  – 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);  $\omega_s$  – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos);  $\varphi$  – latitude (radianos);  $\delta$  – declinação solar (radianos).

A distância relativa Terra-Sol ( $d_r$ ) e a declinação solar ( $\delta$ ) 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);  $\delta$  – declinação solar (radianos);  $J$  – dia juliano.

O ângulo horário correspondente ao pôr do Sol ( $\omega_s$ ) foi obtido por:

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

Sendo:  $\omega_s$  – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos);  $\varphi$  – latitude (radianos);  $\delta$  – 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 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $\alpha$  – 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  $\text{CO}_2$  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 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $\sigma$  – 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<sub>o</sub>* 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 2 – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE**

A seguir encontram-se apresentadas as funções densidade de probabilidade (*fdp*) Uniforme, Exponencial, Normal, Triangular e Gama, e suas respectivas funções de distribuição, que foram utilizadas nos testes de aderência com os dados decenciais de *ETo*, *P*, *DEF* e *EXC*, bem como para determinar os valores prováveis de ocorrência dessas componentes hídricas com a *fdp* de melhor ajuste.

## 1 Distribuição Uniforme

A *fdp* Uniforme é um modelo no qual as realizações de uma variável aleatória estão contidas em um intervalo, ao longo do qual qualquer valor é igualmente provável (Figura A2.1).

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta - \alpha}$$

Sendo:  $f(x; \alpha, \beta)$  – função densidade de probabilidade Uniforme, tendo  $\alpha$  e  $\beta$  como parâmetros;  $x$  – variável aleatória contínua;  $\alpha$  – menor valor;  $\beta$  – maior valor. Validade para  $\alpha \leq x \leq \beta$ .

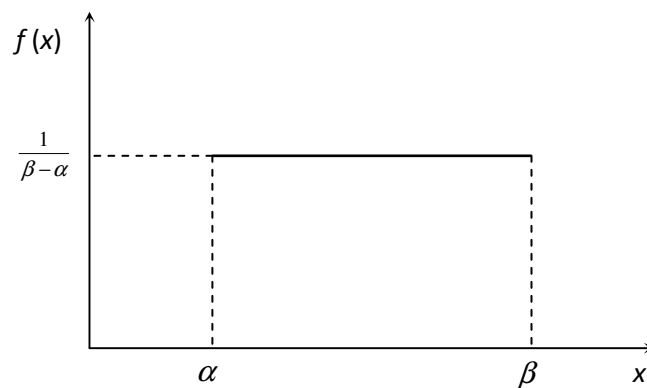


Figura A2.1 – Função densidade de probabilidade Uniforme

A probabilidade que a variável esteja em determinado intervalo é dada pela função distribuição:

$$F(x; \alpha, \beta) = P(X \leq x) = \int_{\alpha}^x \frac{1}{\beta - \alpha} dx = \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}$$

Sendo:  $P(X \leq x)$  – probabilidade que uma variável aleatória  $X$  tenha valores iguais ou menores a  $x$ ;  $x$  – variável aleatória contínua;  $\alpha$  – menor valor da variável aleatória  $x$ ;  $\beta$  – maior valor da variável aleatória  $x$ .

## 2 Distribuição Exponencial

A função densidade de probabilidade Exponencial (Figura A2.2) é dada por:

$$f(x; \beta) = \frac{1}{\beta} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Sendo:  $f(x; \beta)$  – função densidade de probabilidade Exponencial, tendo  $\beta$  como parâmetro;  $x$  – variável aleatória contínua. Validade  $x > 0$ .

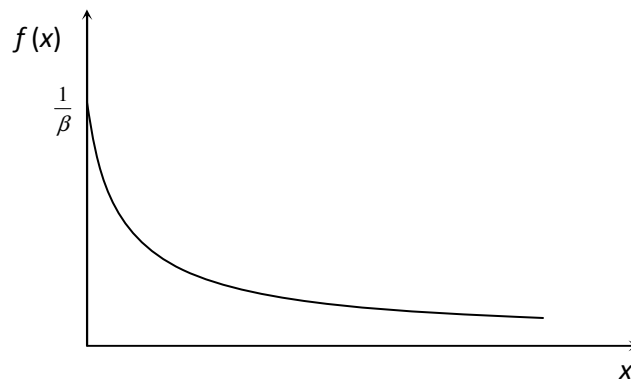


Figura A2.2 – Função densidade de probabilidade Exponencial

A função distribuição é obtida com a expressão:

$$F(x; \beta) = P(X \leq x) = \int_0^x \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x}{\beta}} dx = -e^{-\frac{x}{\beta}} \Big|_0^x = 1 - e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Sendo:  $P(X \leq x)$  – probabilidade que uma variável aleatória  $X$  tenha valores iguais ou menores a  $x$ ;  $\beta$  – parâmetro da distribuição.

## 3 Distribuição Normal

A função densidade de probabilidade Normal (Figura A2.3) é dada por:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$$

Sendo:  $f(x; \mu, \sigma)$  – função densidade de probabilidade Normal, tendo  $\mu$  e  $\sigma^2$  como parâmetros;  $x$  – variável aleatória contínua;  $\mu$  – média da variável aleatória  $x$ ;  $\sigma^2$  – variância da variável aleatória  $x$ . Validade para  $-\infty \leq x \leq +\infty$ .

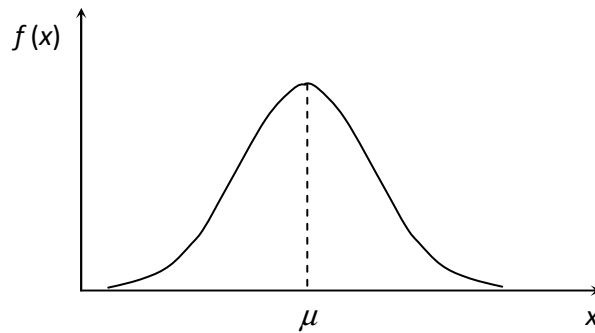


Figura A2.3 – Função densidade de probabilidade Normal

A função distribuição é obtida com a expressão:

$$F(x; \mu, \sigma^2) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Sendo:  $P(X \leq x)$  – probabilidade que uma variável aleatória  $X$  tenha valores iguais ou menores a  $x$ ;  $\mu$  e  $\sigma^2$  – parâmetro da distribuição.

#### 4 Distribuição Triangular

A função densidade de probabilidade Triangular (Figura A2.4) é dada por:

$$f(x; \alpha, \beta, mo) = \begin{cases} \frac{2 \cdot (x - \alpha)}{(\beta - \alpha) \cdot (mo - \alpha)} & \text{para } \alpha \leq x \leq mo \\ \frac{2 \cdot (\beta - x)}{(\beta - \alpha) \cdot (\beta - mo)} & \text{para } mo < x \leq \beta \\ 0 & \text{para outros valores} \end{cases}$$

Sendo:  $f(x; \alpha, \beta, mo)$  – função densidade de probabilidade Triangular, tendo  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $mo$  como parâmetros;  $x$  – variável aleatória contínua;  $\alpha$  – menor valor da variável aleatória  $x$ ;  $\beta$  – maior valor da variável aleatória  $x$ ;  $mo$  – moda da variável aleatória  $x$ . Validade para  $\alpha \leq x \leq \beta$ .

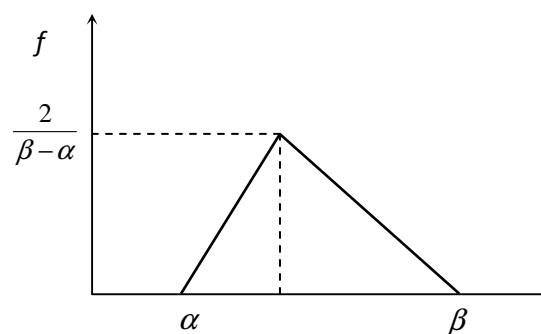


Figura A2.4 – Função densidade de probabilidade Triangular



A função de distribuição correspondente é:

$$F(x; \alpha, \beta, mo) = P(X \leq x) = \frac{(x - \alpha)^2}{(\beta - \alpha) \cdot (mo - \alpha)}, \text{ se } \alpha \leq x \leq mo$$

$$F(x; \alpha, \beta, mo) = P(X \leq x) = \frac{(mo - \alpha)}{(\beta - \alpha)} - \frac{(\beta - x)^2}{(\beta - \alpha) \cdot (\beta - mo)} + \frac{(\beta - mo)}{(\beta - \alpha)}, \text{ se } mo < x \leq \beta$$

Sendo:  $P(X \leq x)$  – probabilidade que uma variável aleatória  $X$  tenha valores iguais ou menores a  $x$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $mo$  – parâmetros da distribuição.

## 5 Distribuição Gama

A função densidade de probabilidade Gama (Figura A2.5) é dada por:

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} \cdot x^{(\alpha-1)} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Sendo:  $f(x; \alpha, \beta)$  – função densidade de probabilidade Gama, tendo  $\alpha$  e  $\beta$  como parâmetros;  $\Gamma(\alpha)$  – função gama;  $x$  – variável aleatória contínua;  $\alpha$  – parâmetro de forma da variável aleatória  $x$ ;  $\beta$  – parâmetro de escala da variável aleatória  $x$ . Validade para  $\beta$  e  $\alpha > 0$ ; e  $0 < x < \infty$ .

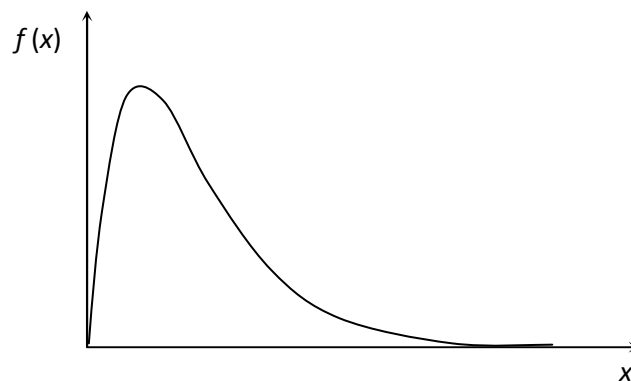


Figura A2.5 – Função densidade de probabilidade Gama

A função de distribuição correspondente é:

$$F(x; \alpha, \beta) = P(X \leq x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \beta^\alpha} \cdot \int_0^x x^{(\alpha-1)} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}} dx$$

Sendo:  $P(X \leq x)$  – probabilidade que uma variável aleatória  $X$  tenha valores iguais ou menores a  $x$ ;  $\alpha$  e  $\beta$  – parâmetros da distribuição.

### **APÊNDICE 3 – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO**

Na Tabela A3.1 encontram-se apresentados os atributos físico-hídricos utilizados para calcular a capacidade de água disponível (*CAD*). Os dados foram determinados em um experimento preliminar, realizado em Telêmaco Borba-PR (Pachechenik, 2010).

Tabela A3.1. Massa específica do solo ( $\rho$ ), porosidade total ( $\alpha$ ), microporosidade, macroporosidade, umidade volumétrica da capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e capacidade de água disponível (*CAD*) do solo cultivado com *Pinus taeda*, em Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

Profundidade (m)	$\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	Macroporo -----	Microporo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\alpha$ -----	$\theta_{CC}$	$\theta_{PMP}$	<i>CAD</i> (mm)
0,0 a 0,1	1100	0,200	0,395	0,598	0,395	0,191	20,4
0,1 a 0,2	1210	0,137	0,403	0,541	0,403	0,215	18,8
0,2 a 0,4	1210	0,140	0,395	0,537	0,395	0,214	36,2
0,4 a 0,6	1230	0,080	0,462	0,542	0,462	0,215	49,4
0,6 a 1,0	1160	0,116	0,443	0,561	0,439	0,195	97,6
CV (%) *	4,5	32,5	7,4	4,6	7,2	5,8	222,4

\* Coeficiente de Variação.

Os valores de *CAD* calculados para o solo foram de 20,4; 18,8; 36,2; 49,4 e 97,6 mm, para as profundidades de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-1,0 m, respectivamente, totalizando 222,4 mm. Como os cálculos do balanço hídrico agrícola (*BHA*) diário foram realizados para uma profundidade efetiva do sistema raticular (*z*) do pinus de 1,0 m, considerou-se nas análises uma *CAD* média de 222,4 mm.

## LITERATURA CITADA

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)