

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIANA VOGADO COELHO

COMPONENTES DO CICLO HIDROLÓGICO E BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA  
PROVÁVEL PARA A CULTURA DA SOJA NO ESTADO DO PIAUÍ

CURITIBA

2019

JULIANA VOGADO COELHO

COMPONENTES DO CICLO HIDROLÓGICO E BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA  
PROVÁVEL PARA A CULTURA DA SOJA NO ESTADO DO PIAUÍ

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 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. Alexandre Cândido Xavier

CURITIBA

2019

C672c Coelho, Juliana Vogado  
Componentes do ciclo hidrológico e balanço hídrico agrícola provável para a cultura da soja no estado do Piauí / Juliana Vogado Coelho. - Curitiba, 2019.  
89 p.: il.,

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo.  
Orientador: Jorge Luiz Moretti De Souza  
Coorientador: Alexandre Cândido Xavier

1. Soja - Piauí. 2. Climatologia agrícola - Piauí. 3. Precipitação (Meteorologia). 4. Evapotranspiração. I. Souza, Jorge Luiz Moretti De (Orientador). II. Xavier, Alexandre Cândido (Coorientador). III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDU 635.655:551.582(812.2)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO -  
40001016014P4

### TERMO DE APROVAÇÃO

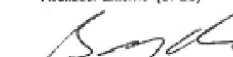
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de JULIANA VOGADO COELHO intitulada: **Componentes do ciclo hidrológico e balanço hídrico agrícola provável para a cultura da soja no estado do Piauí**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVADO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 21 de Fevereiro de 2019.

  
JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
ALEXANDRE CÂNDIDO XAVIER  
Avaliador Externo (UFES)

  
JOÃO CARLOS BESSALHOC FILHO  
Avaliador Externo (UFPR - DFP)

À minha mãe,  
que nestes anos suportou a privação de tempo e atenção,  
sem perder a ternura, amizade e companheirismo.  
Seu apoio, amor e harmonia me conduziram até esta etapa da minha vida.

Com amor, dedico.

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço fielmente a Deus, por todas as oportunidades que tens concedida a mim;
- À minha Mãe, Mariana Vogado, por ser a minha fonte inesgotável de fé, força e coragem;
- À minha família, pelo apoio, incentivo e confiança em mim depositada. Essencialmente fazem parte do que sou;
- À Universidade Federal do Paraná, ao Departamento de Solos e Engenharia Agrícola e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade em realizar o Mestrado;
- Ao Professor Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza pelos ensinamentos acadêmicos e orientações durante o curso;
- Ao Professor Dr. Alexandre Cândido Xavier pela pronta disponibilização dos dados para realização deste trabalho;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa durante o curso;
- Aos companheiros da casinha e Cia, pelos encontros de vida, tornando esta jornada mais leve;
- As minhas companheiras de apartamento, Selma Bastos e Luana Celante. Cada uma, a sua forma, apoiou na realização desta etapa;
- Aos colegas, Jocelito Cruz, Bruno Gurski, Stefanie Rosa e Sísara Oliveira pelo apoio e ajuda nas análises laboratoriais;
- Aos meus amigos da vida acadêmica, Bruna Iwata e Tâncio Gutier, grandes incentivadores desse processo;
- Aos amigos que estiveram distantes fisicamente, mas vibrando por mim.

## RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os valores prováveis da precipitação pluviométrica ( $P$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), bem como das componentes de saída do balanço hídrico agrícola ( $BHA$ ) para a cultura da soja no Estado do Piauí. O trabalho foi estruturado em dois capítulos: Capítulo I – Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência prováveis para o Estado do Piauí; e, Capítulo II – Balanço hídrico agrícola provável para a cultura da soja no Estado do Piauí. A área de estudo considerou todo o Estado do Piauí, os dados climáticos foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional das Águas (ANA) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE). As séries temporais tiveram 36 anos (1980 a 2015), e foram espacializadas em *grid* regular de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , por meio dos melhores interpoladores obtidos por validação cruzada. A  $ET_o$  foi estimada com o método de Penman-Monteith. O  $BHA$  foi calculado para a cultura da soja, com o modelo AquaCrop, considerando variáveis climáticas, pedológicas e culturais. As componentes hídricas –  $P$ ,  $ET_o$ , evapotranspiração real ( $ET_r$ ), deficiência hídrica ( $Def$ ) e armazenamento de água no solo ( $S$ ) – foram calculadas com periodicidade diária, depois agrupadas em decêndios e ajustadas a funções densidade de probabilidade ( $fdp$ 's) para estabelecer os valores de ocorrência à diferentes níveis de probabilidade. As funções de densidade de probabilidade ( $fdp$ 's) Gama e Exponencial apresentaram melhor ajuste às séries dos valores decendiais de  $P$ , e as  $fdp$ 's Normal e Gama ajustaram-se melhor as séries dos valores decendiais de  $ET_o$ ,  $Def$ ,  $ET_r$  e  $S$ . Considerando todo o Estado do Piauí, a  $P$  média total provável foi menor que a  $ET_o$  total média provável. A  $P$  provável foi maior durante estações verão, outono e primavera; e os maiores valores de  $ET_{o25\%}$  ocorrem na região leste/sudeste, independente da estação do ano. O Estado do Piauí tem valores prováveis médios de  $ET_{r25\%} = 21,6 \text{ mm decêndio}^{-1}$ ,  $Def_{25\%} = 31,63 \text{ mm decêndio}^{-1}$  e  $S_{75\%} = 84,0 \text{ mm decêndio}^{-1}$ , para a cultura da soja, no estágio II. A matriz dos parâmetros das  $fdp$ 's de melhores ajuste permitiu calcular rapidamente as componentes hídricas  $P$ ,  $ET_o$ ,  $Def$ ,  $ET_r$  e  $S$  para o *Grid* regular de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  (330 pontos) no Estado do Piauí, para qualquer nível de probabilidade, contribuindo para tomada de decisão e redução de incertezas do cultivo da soja.

Palavras-chave: Aquacrop, Componentes hídricas, Função densidade de probabilidade, Modelagem.

## ABSTRACT

The objective of this study was to determine the probable values of rainfall ( $P$ ) and reference evapotranspiration ( $ET_0$ ), as well as the components of agricultural water balance ( $AWB$ ) output for soybean crop in Piauí State. The work was structured in two chapters: Chapter I - Rainfall and probable evapotranspiration of reference for Piauí State; and, Chapter II - Probable agricultural water balance for the soybean crop in Piauí State. The study area considered the entire Piauí State, climate data were available by the National Institute of Meteorology (INMET), National Water Agency (ANA) and the Department of Water and Electric Power of São Paulo (DAEE). The time series were 36 years (1980 to 2015), spaced in a regular grid of  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , using the best interpolators obtained by cross validation. The  $ET_0$  was estimated using the Penman-Monteith method. The  $AWB$  was calculated for the soybean crop, using the AquaCrop model, considering climatic, pedological and cultural variables. The water components -  $P$ ,  $ET_0$ , real evapotranspiration ( $ET_r$ ), water deficit ( $Def$ ) and soil water storage ( $S$ ) - were calculated daily, then grouped in 10-day period and adjusted to functions probability density ( $pdf$ 's) to establish the occurrence values at different probability levels. The  $pdf$ 's Gamma and Exponential presented a better fit to the series of the decennial values of  $P$ , and the Normal and Gamma  $pdf$ 's were better adjusted for the series of the decennial values of  $ET_0$ ,  $Def$ ,  $ET_r$  and  $S$ . Considering the Piauí State, the total mean likely  $P$  was lower than the probable mean total  $ET_0$ . The probable  $P$  was higher during summer and fall seasons and the highest values of  $ET_{0_{25\%}}$  occur in the east/southeast region, independent of the season. The Piauí State has probable mean values of  $ET_{r_{25\%}} = 21.6 \text{ mm}^{-1}$  10-day period,  $Def_{25\%} = 31.63 \text{ mm}^{-1}$  10-day period and  $S_{75\%} = 84.0 \text{ mm}$  10-day period, for soybean cultivation at stage II. The matrix of the best fit  $pdf$ 's parameters allowed to quickly calculate the water components  $P$ ,  $ET_0$ ,  $Def$ ,  $ET_r$  and  $S$  for the regular  $Grid$  of  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (330 points) in the Piauí State, for any level of probability, contributing to making decision-making and reduction of uncertainties in soybean cultivation.

Keywords: Aquacrop, Water components, Probability density function, Modeling.



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL .....	9
1.1	REFERÊNCIAS .....	14
2	CAPÍTULO I – PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PROVÁVEIS NO ESTADO DO PIAUÍ .....	18
2.1	RESUMO .....	18
2.2	ABSTRACT .....	19
2.3	INTRODUÇÃO .....	20
2.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	22
2.4.1	Caracterização da área de estudo.....	22
2.4.2	Dados meteorológicos e espacialização.....	23
2.4.3	Valores prováveis de Precipitação ( <i>P</i> ) e Evapotranspiração de referência ( <i>ET<sub>o</sub></i> ).....	25
2.4.4	Espacialização dos valores prováveis para o Estado do Piauí .....	26
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
2.6	CONCLUSÕES .....	33
2.7	REFERÊNCIAS .....	34
3	CAPÍTULO II – BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PROVÁVEL PARA A CULTURA DA SOJA NO PIAUÍ.....	37
3.1	RESUMO .....	37
3.2	ABSTRACT .....	38
3.3	INTRODUÇÃO .....	39
3.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	41
3.4.1	Caracterização da área de estudo .....	41
3.4.2	Dados meteorológicos e espacialização.....	42
3.4.3	Cálculo do balanço hídrico agrícola ( <i>BHA</i> ) .....	44
3.4.4	Valor provável das componentes do <i>BHA</i> para o Estado do Piauí .....	46
3.4.5	Espacialização dos valores prováveis para o Estado do Piauí.....	48
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
3.6	CONCLUSÕES .....	56
3.7	REFERÊNCIAS .....	56
4	CONCLUSÃO GERAL .....	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	62
6	REFERÊNCIAS GERAIS .....	63
	APÊNDICE 1 – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE ( <i>FDP</i> ).....	72
	APÊNDICE 2 – PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE.....	78
	APÊNDICE 3 – PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA.....	79
	APÊNDICE 4 – PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PARA A CULTURA DA SOJA, NO ESTADO DO PIAUÍ.....	88

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Estudos envolvendo componentes hídricas do ciclo hidrológico, principalmente precipitação e evapotranspiração, são importantes no desenvolvimento de diversas atividades agrícolas. Da mesma forma, informações obtidas de balanços hídricos realizados com as componentes do ciclo hidrológico auxiliam no planejamento, projeto e manejo de atividades agrícolas de interesse.

O impacto das chuvas na produção de soja na safra 2015/2016 gerou deficiência hídrica final e redução de 64,8% da produção no Estado do Piauí (CONAB, 2016). Segundo Evangelista et al., (2017) a restrição hídrica pode reduzir cerca de 40% da produtividade da soja. O avanço de novas áreas agrícolas no Estado do Piauí demanda tecnologia de cultivo e adaptação das culturas às características edafoclimáticas, já que boa parte das novas áreas apresentam solos de textura arenosa, com baixa fertilidade, e clima com temperaturas elevadas (FRANCISCO; CÂMARA, 2013).

Entre alguns fatores ambientais que afetam a produção agrícola, o efeito do clima explica aproximadamente um terço da variabilidade da produção agrícola (RAY et al., 2015). Informações sobre o clima são cruciais não apenas para prever o rendimento das plantações, mas também para determinar as datas ideais de plantio, a viabilidade econômica de diferentes práticas de manejo e orientar as decisões para maximizar o rendimento esperado das culturas (MARTINS et al., 2018). Na cultura da soja, o estresse hídrico e a temperatura são fatores que promovem perdas consideráveis de produtividade (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014). O índice pluviométrico anual no estado do Piauí é considerado elevado (800 mm a 1400 mm). No entanto, a cultura da soja é submetida a elevado risco climático, devido à irregularidade na distribuição das chuvas, provocada principalmente por períodos de veranicos de diferentes durações, que reduzem sensivelmente o rendimento da cultura (ANDRADE JÚNIOR et al., 2007).

Estudos considerando modelos que simulam o rendimento das culturas agrícolas têm sido bastante aplicados, possibilitando a estimativa de perdas de produtividade com a utilização de programas recomendados para a avaliação de rendimento das culturas de alta produção agrícola (VAREJÃO SILVA; BARROS, 2001). Estimativas da produção de culturas agrícolas com modelos de simulação

permitem expressar condições que estipulem o crescimento e desenvolvimento da cultura (ANDRADE JÚNIOR et al., 2006), integrando conhecimentos dos processos biofísicos que ocorrem no sistema água-solo-planta, bem como a identificação e avaliação do desempenho da produção (LORENÇONI et al., 2010).

Os modelos de culturas ajudam a melhorar a gestão agrícola, permitindo análises de cenários e estratégias de manejo, como datas e densidades de plantio, monitoramento da colheita e previsão do crescimento da cultura. Tais modelos são usados para simular sistemas de cultivo em resposta ao clima e à gestão agrícola (HOPMANS; BRISTOW, 2002; GERVOIS et al., 2004; TIXIER et al., 2007; GURSKI et al., 2018).

Uma opção interessante na estimativa da produtividade dos cultivos consiste na utilização de modelos agrometeorológicos. Além de estimar a produtividade, esses modelos permitem identificar as variáveis meteorológicas mais influentes nas fases fenológicas de cada cultivo e entender as condições climáticas (MORETO; ROLIM, 2015; MORETO et al., 2017).

Os modelos de simulação de culturas agrícolas são ferramentas valiosas para quantificar a sua resposta à água e conceber estratégias para melhorar a gestão da água na agricultura. No entanto, uma característica comum da maioria dos modelos é o requisito de dados de entrada altamente detalhados e informações sobre o crescimento de culturas que não estão disponíveis na maioria dos locais em todo o mundo. Por isso, conforme levantamento realizado por Oliveira (2017) existem diversos modelos e metodologias no meio científico para estimar as componentes hídricas que correspondam à realidade do sistema em estudo (TABELA 1.1).

Existem modelos que quantificam o efeito do ambiental no crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas. A modelagem do desempenho das culturas ajuda a entender o seu comportamento fisiológico em diferentes condições, realizar o manejo adequado sob condições de estresse hídrico e prever o rendimento. O AquaCrop foi desenvolvido pela *Food and Agriculture Organisation* (FAO) para auxiliar na simulação do desenvolvimento das culturas em diversos cenários. O AquaCrop difere dos principais modelos de simulação de produção agrícola por sua simplicidade, precisão e robustez, sendo considerado uma evolução dos modelos de simulação (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009). Os principais

dados de entrada necessários no AquaCrop são: tipo de cultura, clima, solo, práticas de manejo e condições iniciais de água do solo (RAES et al., 2009).

TABELA 1.1. PRINCIPAIS MODELOS UTILIZADOS PARA CALCULAR O BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA, TOTAL OU PARCIALMENTE, CONSIDERANDO AS CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DO LOCAL DE CULTIVO.

Itens	Especificação
----- APSIM – Agricultural Production Systems sIMulator (KEATING et al., 2003) -----	
Descrição:	Simulador de sistemas agrícolas que combina a estimativa do rendimento agrícola em resposta ao manejo, com previsão das consequências a longo prazo das práticas agrícolas sobre os recursos do solo.
Componentes:	Culturas, pastagens e florestas; Balanço hídrico do solo e movimento dos solutos; Matéria orgânica do solo e nitrogênio; Resíduos no solo; Fósforo; Solo; Erosão; e, Manejo.
Limitações:	Variabilidade espacial dos resultados; Necessidade de grande número de dados de entrada; e, Limitação no número de dados de saída.
Aplicações:	Gestão de culturas; Equilíbrio hídrico; Impactos climáticos; Sistemas de cultivo; Interações entre espécies; Uso do solo; Impactos do solo; e, Adaptação das culturas.
----- AQUACROP – Crop-water productivity model (Steduto et al., 2009) -----	
Descrição:	Simulador de sistemas agrícolas que combina a estimativa do rendimento em resposta ao manejo e sob diferentes tipos de estresses (hídrico, térmico, salinidade, fertilidade), bem como simulação de balanços hídricos do sistema.
Componentes:	Produtividade de culturas, pastagens e florestas; e Balanço hídrico agrícola.
Limitações:	Variabilidade espacial dos resultados; Necessidade de grande número de dados de entrada; e, Impossibilidade de inserir ou modificar funções intrínsecas ao modelo.
Aplicações:	Estimativa do impacto climático, solos e manejo sobre o rendimento das culturas; Manejo irrigacionista; Gestão de culturas; Previsão de rendimentos e safras; Diagnóstico hídrico de sistemas complexos.
----- CROPSYST – Cropping Systems Simulation Model (STOCKLE et al., 2003) -----	
Descrição:	Conjunto de programas projetados para trabalhar em cooperação, fornecendo ao usuário ferramentas de análise de produtividade e impacto ambiental de rotações de culturas e manejos de sistemas de cultivo em escalas temporais e espaciais.
Componentes:	Editor de parâmetros; Simulador de sistemas de cultivo; Gerador de clima; Co-operador de simulação GIS-CROPSYST; Ferramenta de análise de bacias hidrográficas; e, Outros programas utilitários.
Limitações:	Dificuldade na avaliação de alguns dados de saída do modelo; Necessidade de muitos dados para avaliar o desempenho do modelo; Escolha de índices quantitativos usados para avaliar o desempenho do modelo; e, A discrepâncias entre os valores simulados e medidos em séries temporais não são devidamente avaliadas.
Aplicações:	Estimativa do impacto climático, solos e manejo sobre o rendimento das culturas; Equilíbrio de água e nitrogênio; Adaptação da cultura à seca; Outros problemas do sistema de cultivo.
---- DSSAT-CSM – Decision Support System for Agrotechnology Transfer - Cropping System Model (JONES et al., 2003) ----	
Descrição:	Modelo principal que possui um conjunto de modelos de simulação em seu núcleo, permitindo a simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas.
Componentes:	Meteorológicos; Solo; Solo-Planta-Atmosfera; Modelo de cultura (CROPGRO); Planta (cultivo individual); Manejo; e, Pragas.
Limitações:	Restrição das simulações para algumas culturas; Dificuldade para realizar validação do modelo; e, Algumas variáveis de saída são difíceis de serem avaliadas.
Aplicações:	Manejo de fertilizantes, irrigação, culturas e pragas; Poluição ambiental; Previsão de rendimento; Mudança e variabilidade climática; e, Segurança alimentar.
----- STICS – Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard (BRISSON et al., 2003) -----	
Descrição:	Modelo que simula o sistema solo-planta ao longo do ciclo das culturas ou vários ciclos da cultura, simulando rotações de cultivo.
Componentes:	Fenologia; Crescimento do broto; Formação do rendimento; Crescimento radicular; Manejo de culturas; Microclima; e, Balanço hídrico.
Limitações:	Diferença entre as escalas esperadas para os resultados do modelo e as escalas necessárias para descrever os processos; Limitação no número de dados de saída; e, Os mecanismos simulados definem parcialmente o intervalo de validade do modelo, assim certas combinações ambiente/manejo são excluídas da sua gama de aplicações.
Aplicações:	Análise da deficiência hídrica para determinada cultura; Balanço hídrico da cultura; Diagnósticos agrônômicos ou ambientais; Otimização do manejo de culturas; e, Estimativa do potencial de um ambiente.

FONTE: adaptado de Oliveira (2017)

O modelo AquaCrop tem sido amplamente utilizado em diferentes ambientes e condições climáticas para estimar o rendimento das culturas. Nas regiões semiáridas, vale ressaltar os estudos realizados na região central do Quênia (NGETICH et al., 2012), no sul do Irã (SHAMSNIA; PRIMORADIAN, 2013). No sul do Brasil já foi utilizado para a cultura da soja, milho e trigo (PIEKARSKI, 2016; OLIVEIRA, 2017; GUSRKI et al., 2018; ROSA, 2018). O modelo também já foi extensivamente testado para diferentes culturas, como o milho e outras culturas herbáceas, bem como árvores frutíferas e videiras (HSIAO et al., 2009).

Informações obtidas em balanços hídricos auxiliam na formulação de políticas e adequação da cultura para a estimativa de valores adequados ao planejamento de atividades agrícolas, para contornar limitações existentes (ARAYA et al., 2010). Dessa forma, possibilitam identificar fases de desenvolvimento da cultura que apresentam deficiência e excedente hídrico, caracterizar condições agroclimáticas, entender, modelar e quantificar parâmetros de desenvolvimento e produção da cultura. Portanto, muitos estudos nas últimas décadas usaram experimentos de campo e modelagem numérica para entender as interações entre clima e agricultura (GREATREX, 2012).

Estudos envolvendo o comportamento das plantas com o uso da água no solo, e como respondem aos níveis de disponibilidade com o balanço hídrico, pode ser uma saída viável para o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo agrícola (SILVA et al., 2011). Para a adequada determinação da probabilidade de ocorrência da deficiência hídrica, Silva et al. (2008) comentam que deve-se considerar o método de estimativa da evapotranspiração, periodicidade adotada na realização do balanço hídrico, bem como a escolha das funções densidade de probabilidade (*fdp*) que melhor se ajustam para a deficiência hídrica.

A função densidade de probabilidade (*fdp*) descreve a chance que uma variável pode assumir considerando uma amostra de valores (DENSKI; BACK, 2015). A escolha da *fdp* para determinada variável é realizada conforme o melhor ajuste com as séries históricas, estando diretamente ligado à natureza dos dados a que ela se relaciona (SOUZA et al., 2014; BARRETO et al., 2015).

As distribuições e funções densidade de probabilidade são bastante utilizadas em trabalhos probabilísticos envolvendo variáveis climáticas (SOUZA et al., 2014;

JERSZURKI et al., 2015; GURSKI et al., 2017; GURSKI et al., 2018). Algumas *fdp's* requerem grande série de observações, outras possuem boa capacidade de estimação para pequeno número de dados. Desde que respeitado o aspecto da representatividade dos dados, as estimativas dos seus parâmetros para determinada região podem ser estabelecidas como de uso geral, sem prejuízo da precisão na estimação da probabilidade (CATALUNHA et al., 2002).

Séries de valores das componentes do balanço hídrico, realizados para determinada periodicidade, como precipitação pluvial ( $P$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e evapotranspiração real ( $ER$ ), armazenamento da água no solo ( $ARM$ ), deficiência hídrica ( $Def$ ) e excedente hídrico ( $Exc$ ) permitem a realização de estudos de valores prováveis.

O Estado do Piauí vem se destacando economicamente no cenário da produção, sendo considerada uma nova fronteira agrícola. No entanto, estudos prováveis e temporais das componentes do ciclo hidrológico e balanço hídrico agrícola requerem estudos mais detalhados para as culturas, principalmente a soja, visando o melhoramento do planejamento da atividade agrícola no Estado. Neste sentido, teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os valores prováveis da precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência, bem como das componentes de saída do balanço hídrico agrícola para a cultura da soja, no Estado do Piauí.

Para alcançar o objetivo proposto, o presente trabalho encontra-se dividido em dois capítulos:

Capítulo I – Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência prováveis para o Estado do Piauí; e,

Capítulo II – Balanço hídrico agrícola provável para a cultura da soja no Estado do Piauí.

## 1.1 REFERÊNCIAS

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SILVA, C. O. Zoneamento de risco climático para a cultura da soja no Estado do Piauí. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2007. 23 p.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M.; CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q. Parametrização de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade da cultura do milho na região de Parnaíba, Piauí. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.37, p. 130-134, ago./dez. 2006.

ARAYA A.; KEESSTRA S. D.; STROOSNIJDER L. A new agro-climatic classification for crop suitability zoning in northern semi-arid Ethiopia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Mekelle, v. 150, p. 1057–1064, oct./apr. 2010.

BARRETO, H. B. F.; PEREIRA, G. M.; SANTOS W. O.; FREIRE, F. G. C.; MAIA P. M. E. Avaliação de funções de probabilidade e relação-intensidade-duração-frequência para precipitação extrema em Nepomuceno-MG. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 08, n. 02, p.118–127, mai./ago. 2015.

BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; ZIMMER, D.; SIERRA, J.; BERTUZZI, P.; BURGER, P.; BUSSIÈRE, F.; CABIDOCHÉ, Y. M.; CELLIER, P.; DEBAEKE, P.; GAUDILLÈRE, J. P.; HÉNAULT, C.; MARAUZ, F.; SEGUIN, B. Na overview of the crop model STICS. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 309-332. 2003.

CATALUNHA, M. J.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 153-162. 2002.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Oitavo levantamento. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos**, Brasília, v. 3, n. 8, p.1-134, maio 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 maio 2016.

DENSKI, A. P. N.; BACK, A. J. Aderência de distribuições de probabilidade de evapotranspiração de referência decenal. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 17, jul./dez. 2015.

EVANGELISTA, B. A.; SILVA, F. A. M.; SIMON, J.; CAMPOS, L. J. M.; VALE, T. M. Zoneamento de risco climático para determinação de épocas de semeadura da cultura da soja na região do MATOPIBA. Embrapa Pesca e Aquicultura, Palmas, jul. 2017.

FRANCISCO, E. A. B.; CÂMARA, G. M. S. Desafios atuais para o aumento da produtividade da soja. **Informações agrônômicas** Nº 143 – Setembro, 2013.

GERVOIS, S.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; VIOVY, N.; CIAIS, P.; BRISSON, N.; SEGUIN, B.; PERRIER, A. Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites. **Earth Interact**, v. 8, p. 1–25. 2004.

GREATREX, H. L.; GRIMES, D. I. F.; WHEELER, T. Application of seasonal rainfall forecasts and satellite rainfall observations to crop yield forecasting for Africa. v. 11, p. 5434. 2012.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; XAVIER, A. C.; GRABARSKI, F. A. P.; UMLAUF, C. R. **Balanço hídrico agrícola provável para as culturas milho e soja no Estado do Paraná**. In: V Congresso Online - Agronomia, São Paulo, 2018.

GURSKI, B.C.; SOUZA, J.L.M.; BARROCA, M.V.; XAVIER, A.C.; JERSZURKI, D. **Evapotranspiração de referência e precipitação pluviométrica prováveis no Estado do Paraná**. In: V Congresso Online - Agronomia, São Paulo, 2017.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. O agronegócio da soja nos contextos mundial. Londrina, **Embrapa Soja**, p. 70. 2014.

HOPMANS, J. W.; BRISTOW, K. L. Current capabilities and future needs of root water and nutrient uptake modeling. **Advances in Agronomy**, v. 77, p. 103–183. 2002.

HSIAO, T. S.; HENG, L.; STETUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 448–459, jun./may. 2009.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J.L.M.; EVANGELISTA, A.W.P. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba – PR. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 33, n. 2, p.118-129, jul./jan. 2015.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOW, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**. 2003.

KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; HARGREAVES, J. N. G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J. P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, E.; BRISTOW, K. L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R. L.; FREEBAIRN, D. M.; SMITH, C. J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal Agronomy**, v. 18, p. 267-288. 2003.

LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; HEINEMANN, A. B. Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 605-613, out./dez. 2010.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; GIAROLLA, A.; GAROFOLO, L. L.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; PAOLICCHI, L. T. L. C.; PINTO, G. L. N. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, v. 160, p. 21-30, nov./nov. 2018.

MORETO, V. B.; ROLIM, G. S. Estimation of annual yield and quality of “Valencia” orange related to monthly water deficiencies. **African Journal of Agricultural Research**, v.10, n. 1, p. 543-553, aug./dec. 2015.



MORETO, V. B.; ROLIM, G. S.; ZACARIN, B. G.; VANIN, A. P.; SOUZA, L. M.; LATADO, R. R. Agrometeorological models for forecasting the qualitative attributes of “Valência” oranges. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, p. 847-864, nov./aug. 2017.

NGETICH, K. F.; RAES, D.; SHISANYA, C. A.; MUGWE, J.; MUCHERU-MUNA, M.; MUGENDI, D. N.; DIELS, J. Calibration and validation of AquaCrop model for maize in sub-humid and semiarid regions of central highlands of Kenya. In: Third RUFORUM Biennial Meeting 24–28 September. Uganda, Entebbe. 2012.

OLIVEIRA C. T. **Modelo AquaCrop: calibração, validação e uso para soja e milho na região dos Campos Gerais**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017..

PIEKARSKI, K. R. **Produtividades de soja e milho estimadas com o modelo aquacrop na região dos Campos Gerais**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop–The FAO crop model to simulate yield response to water: Roma: FAO; 2009.

RAY, D. K.; GERBER, J. S.; MACDONALD, G. K.; WEST, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6. 2015.

ROSA, S. L. K. **Análise de sensibilidade, calibração e validação da produtividade do trigo com o modelo AquaCrop na região dos Campos Gerais**. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

SHAMSNIA, S. A.; PRIMORADIAN, N. Simulation of rainfed wheat yield response to climatic fluctuations using model (case study: Shiraz Region in Southern of Iran). **International Journal of Engineering Science Invention**, v. 2, p. 51–56. 2013.

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**, v.38, n.7, p. 1893-1899, dez./mar, 2008.

SILVA, A. C.; LIMA, L. A.; EVANGELISTA, A. W. P.; MARTINS, C. P. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do cafeeiro irrigado por pivô central. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.12, p.1215–1221, mar./set. 2011.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; GOMES, S. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 2, p. 279-291, abr./jun. 2014.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v.101, p. 426-437. 2009.

STOCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 289-307. 2003.

TIXIER, P.; MALÉZIEUX, E.; DOREL, M.; BOCKSTALLER, C.; GIRARDIN, P. Rpest- an indicator linked to a crop model to assess the dynamics of the risk of pesticide water pollution. Application to banana based cropping systems. **European Journal of Agronomy**, v. 26, p. 71–81. 2007.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; BARROS, A. H. C. Zoneamento de aptidão climática do Estado de Pernambuco para três distintos cenários pluviométricos. Recife: COTEC/DATA AGROS/SPRRA-PE, 2001. 38p. (Relatório Técnico).

## 2 CAPÍTULO I – PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PROVÁVEIS NO ESTADO DO PIAUÍ

### 2.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os parâmetros estatísticos de cinco funções de densidade de probabilidade (*fdp's*: Gama, Normal, Triangular, Uniforme e Exponencial), ajustadas aos valores decendiais observados de precipitação pluvial (*P*) e evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) prováveis no Estado do Piauí, bem como calcular os valores da *ET<sub>o</sub>* e *P* com 25% e 75% de probabilidade, respectivamente. As séries de dados climáticos utilizadas (1980 a 2015; 36 anos) são provenientes da Agência Nacional de Águas, Instituto Nacional de Meteorologia e do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo. Os dados meteorológicos utilizados foram de em *grid* regular de 0,25° x 0,25°, totalizando na área de estudo 330 pontos para análise. A *ET<sub>o</sub>* foi calculada diariamente com o método de Penman-Monteith. Os dados diários de *ET<sub>o</sub>* e *P* foram somados e agrupados em períodos de dez dias (decêndios), totalizando 37 decêndios por ano. Para a verificação do ajustamento das *fdp's* às séries de *ET<sub>o</sub>* e *P* de cada localidade foram realizadas distribuições de frequência e aplicados testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. Os resultados dos valores decendiais prováveis de *ET<sub>o25%</sub>* e *P<sub>75%</sub>* foram organizados conforme as estações do ano (verão, outono, inverno, primavera), e com a média dos decêndios do período foram gerados mapas utilizando o método de interpolação *krigagem* ordinária. As funções densidade de probabilidade Gama (67%) e Exponencial (21%) ajustaram-se melhor às séries de valores decendiais de *P*, enquanto Normal (52%) e Gama (34%) ajustaram-se melhor as séries de valores decendiais de *ET<sub>o</sub>*. A *P<sub>75%</sub>* total média provável foi menor que a *ET<sub>o25%</sub>* total média provável. A *P<sub>75%</sub>* foi maior durante as estações verão e outono na região litorânea e centro-norte e na região sul/sudeste durante a primavera. Os maiores valores de *ET<sub>o25%</sub>* ocorre na região leste/sudeste, independente da estação do ano.

Palavras-chave: Componentes hídricas. Função densidade de probabilidade. Teste de aderência. Parâmetros estatísticos.

## 2.2 ABSTRACT

The objective of this work was to determine the statistical parameters of five probability density functions (*pdf's*: Gamma, Normal, Triangular, Uniform and Exponential), adjusted to the observed values of rainfall precipitation ( $P$ ) and reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) in the state of Piauí, as well as to calculate the  $ET_o$  and  $P$  values with 25% and 75% probability, respectively. The series of climatic data used (1980 to 2015; 36 years) came from the National Water Agency, National Meteorological Institute and the Department of Water and Electric Power of São Paulo. The climatic data were spatialized with the best interpolators in a regular grid of  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , generating 330 points for analysis. The  $ET_o$  was calculated daily with the Penman-Monteith method. The daily data of  $ET_o$  and  $P$  were summed and grouped in 10-day period (decadal), totaling 37 decimais per year. In order to verify the adjustment of the *pdf's* to the  $ET_o$  and  $P$  series of each locality, frequency distributions were applied and Kolmogorov-Smirnov adhesion tests were applied at 5% probability. The results of the probable 10-day values of  $ET_{o25\%}$  and  $P_{75\%}$  were organized according to the seasons (summer, autumn, winter, spring), and with the average of the periodic troughs, maps were generated using the ordinary kriging interpolation method. The probability density functions Gamma (67%) and Exponential (21%) were better fitted to the series of values of  $P$ , while Normal (52%) and Gamma (34%) were better fitted the series of values  $ET_o$ . The probable mean total  $P_{75\%}$  was lower than the probable mean total  $ET_{o25\%}$ .  $P_{75\%}$  was higher during the summer and fall seasons in the coastal and north-central regions. The highest values of  $ET_{o25\%}$  occur in the east / southeast region, independent of the season of the year.

Keywords: Water components. Probability density function. Adhesion test. Statistical parameters.

## 2.3 INTRODUÇÃO

A escassez dos recursos hídricos em regiões com sazonalidade em disponibilidade de água requer atividades de controle, uso e manejo adequado. O setor agrícola é o de maior exigência quanto à quantidade de água devido a demanda para o desenvolvimento das culturas, tornando-se relevante o estudo sobre as componentes hídricas, como a precipitação pluvial e evapotranspiração (SILVA et al., 2011).

Vários trabalhos têm sido realizados no Estado do Piauí visando caracterizar a tendência e distribuição da precipitação pluvial ( $P$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) (ANDRADE JÚNIOR et al., 2003; GOMES et al., 2005; ANDRADE JÚNIOR et al., 2017). Geralmente, os estudos são realizados considerando curtos períodos de tempo (ano, meses) e localidades isoladas, não sendo suficientemente conclusivos para verificar riscos no planejamento agrícola.

O Estado do Piauí possui características climáticas distintas. Estudos prováveis da ocorrência de precipitação e evapotranspiração de referência em áreas com baixos índices pluviométricos auxiliam o planejamento de atividades agrícolas (BARRETO et al., 2015; TAGLIAFERRE et al. 2012).

A evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) é importante para o dimensionamento de sistemas e manejo de água para irrigação. Os valores de  $ET_o$  podem ser medidos ou estimados. Contudo, devido à complexidade e dificuldade de realizar medidas, a estimativa da  $ET_o$  é muito utilizada, sendo que existem inúmeros métodos para essa finalidade (SOUZA, 2017). A literatura possui diversos métodos de estimativa da  $ET_o$ , que podem apresentar maior ou menor complexidade, sendo que todos necessitam de uma ou mais variáveis climáticas (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972; HARGREAVES; SAMANI, 1985; THORNTHWAITE, 1948; ALLEN et al., 1998; CAMARGO et al., 1999; JERSZURKI et al., 2017). O método de Penman-Monteith considera variáveis como as temperaturas máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar, sendo recomendado como método padronizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO). O método é considerado internacionalmente o mais apropriado para estimar a  $ET_o$  (ALLEN et al., 1998).

As distribuições e funções densidade de probabilidade são bastante utilizadas em trabalhos probabilísticos envolvendo variáveis climáticas, como a precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (SOUZA et al., 2014; JERSZURKI et al., 2015; GURSKI et al., 2017). Estudos envolvendo a estimativa da precipitação provável possibilitam determinar a melhor época de preparo do solo, colheita, semeadura, aplicação de adubos, defensivos e lâmina complementar de irrigação (ÁVILA et al., 2009).

A função densidade de probabilidade (*fdp*) descreve a chance que uma variável pode assumir considerando séries de valores (DENSKI; BACK, 2015). A escolha da *fdp* para determinada variável é realizada conforme o melhor ajuste com as séries históricas, estando diretamente ligado à natureza dos dados a que ela se relaciona (SOUZA et al., 2014; BARRETO et al., 2015).

Existem diversas *fdp*'s para estimar a frequência de ocorrência de variáveis climáticas. As *fdp*'s Beta, Normal, Log Normal e Gama são as mais indicadas para estudo da evapotranspiração (DENSKI; BACK, 2015). A *fdp* Gama e Log-Normal são as mais utilizadas para a estimativa da precipitação (ASSIS et al., 1996). Saad e Scaloppi (1988) recomendam que não se deve trabalhar com nível de probabilidade de ocorrência de precipitação inferior a 50%. Doorenbos e Pruitt, (1977) recomendam a escolha de valores que tenham probabilidade de ocorrer, em média, três vezes a cada quatro anos, para que haja minimização dos riscos e custos na elaboração de projetos agrícolas baseando-se na *ET<sub>o</sub>*. Níveis mais elevados de probabilidade (80 a 90%) são selecionados para culturas de grande valor econômico e condições reduzidas de água disponível no solo (PRUITT et al., 1972; JENSEN, 1974). Saad e Scaloppi (1988) consideram que nas condições de irrigação complementar normalmente são utilizados níveis que variam entre 50 a 75% para a precipitação pluviométrica.

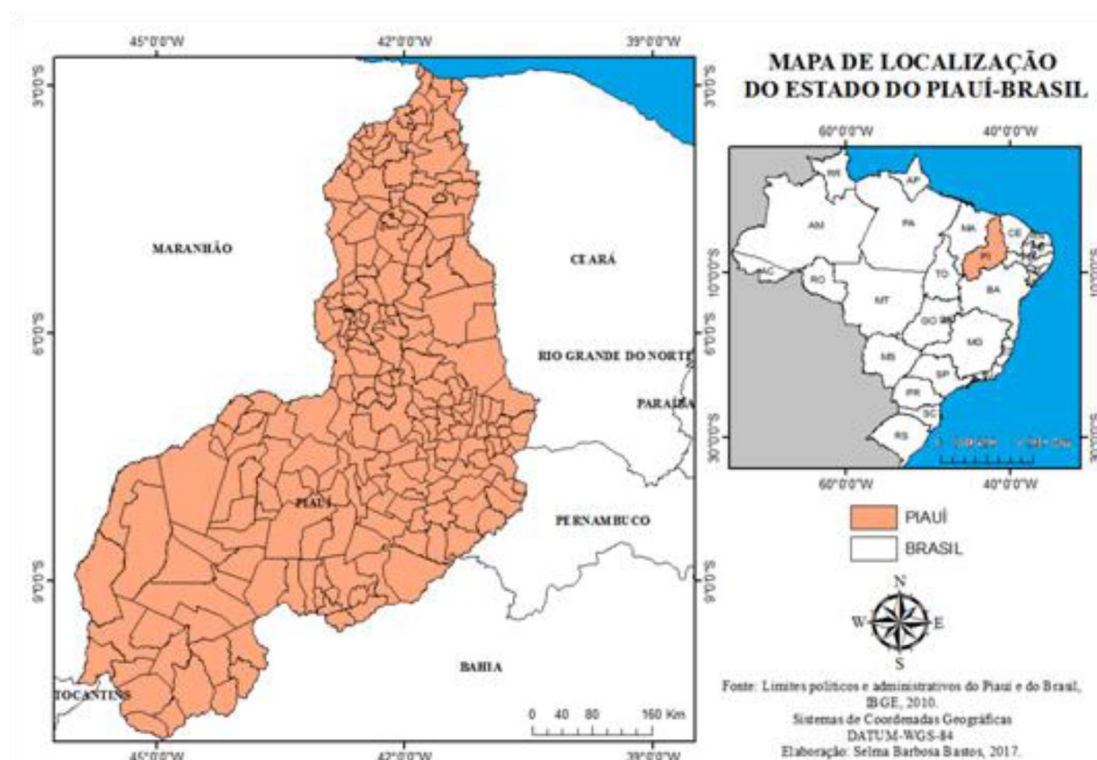
Como o estudo das variações climáticas é estratégia para dimensionamento de sistemas agrícolas, teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os parâmetros estatísticos de cinco funções de densidade de probabilidade (*fdp*: Gama, Normal, Triangular, Uniforme e Exponencial), ajustadas aos valores decendiais observados de precipitação pluvial (*P*) e evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) prováveis no Estado do Piauí, bem como calcular os valores da *ET<sub>o</sub>* e *P* com 25% e 75% de probabilidade, respectivamente.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.4.1 Caracterização da área de estudo

O Estado do Piauí está localizado na região Nordeste do Brasil (FIGURA 2.1). Possui 224 municípios, abrangendo área aproximada de 251.529,2 km<sup>2</sup>, correspondendo a 16,2% da área nordestina e 2,95% da área nacional. O Piauí limita-se ao norte com o Oceano Atlântico, ao sul com os Estados da Bahia e Tocantins, a leste com os Estados do Ceará e Pernambuco, e a oeste com o Estado do Maranhão (CEPRO, 2004).

FIGURA 2.1 – LOCALIZAÇÃO E DIVISÃO GEOPOLÍTICA DO ESTADO DO PIAUÍ.



FONTE: Adaptado IBGE (2010)

O Estado do Piauí tem dois tipos climáticos, conforme a classificação de Álvares et al. (2013): *Aw* e *BSh*. O clima tropical quente e úmido (*Aw*) apresenta chuvas no verão e inverno seco, com precipitação anual acima de 800 mm. O clima semi-árido seco e quente (*BSh*) apresenta chuvas de verão e inverno seco, com precipitação anual inferior a 500 mm e evapotranspiração potencial anual superior à precipitação anual.

Os valores de precipitação, temperatura média do ar e umidade relativa do ar são extremamente variáveis nas diversas regiões do Estado do Piauí. A precipitação tem máximos entre 1600 mm e 1800 mm na região centro-norte, e entre 400 mm a 600 mm na região sudeste (semiárido). Os valores de temperatura variam entre 28 °C e 30 °C na região centro-norte, e entre 26 °C a 28 °C nas regiões sul e leste, em que predominam formações de chapadas e serras, com altitudes mais elevadas. As maiores umidades relativas do ar (70% a 75%) predominam na região centro-norte, e os menores (60% a 65%) na região sudeste (ANDRADE JÚNIOR et al., 2009).

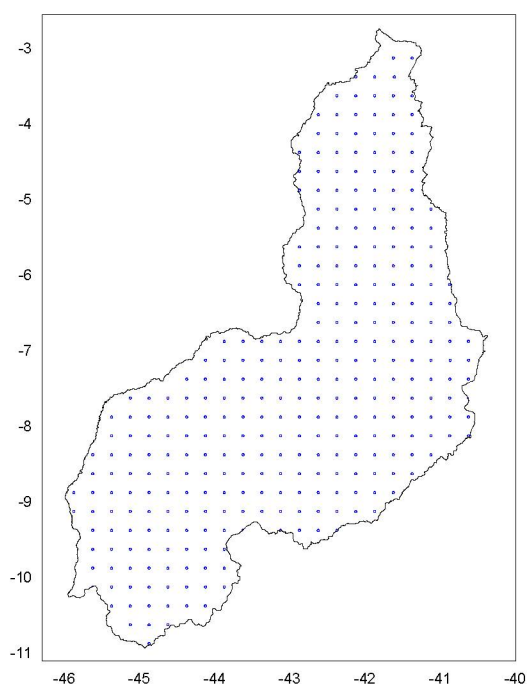
#### 2.4.2 Dados meteorológicos e espacialização

O estudo realizado por Xavier et al. (2016) disponibilizou o grid de dados climáticos espacializados utilizados para a realização do presente estudo. Os dados de precipitação pluviométrica utilizados nas análises foram medidos diariamente em pluviômetros, em estações meteorológicas convencionais e automáticas no período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2015, totalizando série histórica de 36 anos. As fontes dos dados foram o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional das Águas (ANA) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE). A tabulação e organização dos dados fornecidos foram processadas em planilha eletrônica. As variáveis meteorológicas temperatura máxima ( $T_{max}$ ; °C), mínima ( $T_{min}$ ; °C) e média ( $T_{med}$ ; °C) do ar, umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), velocidade do vento a 2 m de altura ( $u_2$ , m s<sup>-1</sup>), precipitação pluviométrica ( $P$ ; mm), brilho solar diário ( $n$ ; horas) foram provenientes de estações meteorológicas convencionais. As leituras de radiação solar incidente diária ( $Rs$ , MJ m<sup>-2</sup>) foram provenientes do banco de dados das estações automáticas do INMET. Os dados da ANA e DAEE foram limitados à precipitação pluviométrica ( $P$ ).

Utilizando análise de validação cruzada, Xavier et al. (2016) determinaram que a ponderação da distância inversa e ponderação de distância angular foram os melhores métodos de interpolação para todos variáveis que testaram. Os dados meteorológicos foram espacializados em *grid* regular na resolução de 0,25° x 0,25°, cobrindo todo o Brasil. No presente estudo, utilizou-se os dados meteorológicos ( $P$ ,  $T_{máx}$ ,  $T_{mín}$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $U_2$ ,  $n$ ,  $Rs$ ) diários (36 anos), de um *grid* regular abrangendo 330 pontos em o Estado do Piauí (FIGURA 2.2).



FIGURA 2.2 – GRID REGULAR 0,25° x 0,25°, CONTENDO OS 330 PONTOS NO ESTADO DO PIAUÍ, EM QUE FORAM ANALISADOS OS VALORES DIÁRIOS DE  $ET_0$  E  $P$ , AGRUPADOS EM DECÊNDIOS.



FONTE: O autor (2018)

Os valores de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) foram calculados por Xavier et al. (2016) conforme a *Food and Agriculture Organization* (FAO), usando o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{Cn}{(T_{med} + 273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + Cd \cdot U_2)}$$

Sendo:  $ET_0$  – evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $\Delta$  – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $Rn$  – radiação líquida na superfície ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $G$  – balanço do fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $\gamma_{psy}$  – 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 ( $\text{m s}^{-1}$ );  $es$  – pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa}$ );  $ea$  – pressão atual do vapor ( $\text{kPa}$ );  $Cn$  – constante relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados, sendo considerado igual a 900 para a grama batatais (adimensional);  $Cd$  – constante relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados, sendo considerada igual a 0,34 para a grama batatais (adimensional).

### 2.4.3 Valores prováveis de Precipitação ( $P$ ) e Evapotranspiração de referência ( $ET_o$ )

Os procedimentos necessários para o cálculo da  $P$  e  $ET_o$  decendial provável foram organizados e realizados em planilha eletrônica, contendo rotinas desenvolvidas especialmente para essa finalidade (SOUZA et al., 2013), seguindo as recomendações de Souza et al. (2018):

i) Agrupamentos dos dados diários de  $P$  e  $ET_o$ , em decêndios (período de dez dias). Os valores diários  $P$  e  $ET_o$  foram organizados em 37 decêndios por ano. O trigésimo sétimo decêndio de cada ano foi composto pelos cinco ou seis (ano bissexto) últimos dias do ano. No caso da  $P$ , os dados diários foram tabulados e agrupados, separando os decêndios com valor igual à zero dos diferentes de zero. Para evitar inconsistências na estimativa dos parâmetros das  $fdp$ 's utilizadas, os decêndios com valor inferior a  $1 \text{ mm decêndio}^{-1}$  foram considerados iguais a zero.

ii) Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados observados das séries decendiais de  $P$  e  $ET_o$ ;

iii) Determinação dos parâmetros estatísticos de cinco funções densidade de probabilidade ( $fdp$ 's) testadas (Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme) com as séries de valores decendiais (APÊNDICE 1). Os parâmetros estatísticos determinados foram: alfa e beta, para a  $fdp$  Gama; média e desvio padrão, para a Normal; maior valor, menor valor e moda, para a Triangular; média, para a Exponencial; e maior e menor valor, para a Uniforme (ASSIS et al., 1996; BUSSAB; MORETTIN, 2010).

iv) Realização dos testes de aderência seguindo a metodologia de Kolmogorov-Smirnov (ASSIS et al., 1996; SOUZA, 2018), a 5% de probabilidade. O teste avalia por meio do valor  $D_{max}$ , o ajuste entre a  $fdp$  acumulada teórica  $F'(x)$  e a distribuição de frequência,  $F(x)$ , proveniente dos dados amostrados.

$$D_{max} = \text{Max } |F(x) - F'(x)|$$

Sendo:  $D_{max}$  – valor crítico para a estatística de Kolmogorov-Smirnov;  $F(x)$  – função de distribuição de probabilidade teórica;  $F'(x)$  – função de distribuição de probabilidade observada.

Para a condição “ $D_{max}$  calculado  $<$   $D_{max}$  tabelado” aceita-se a hipótese de que os valores da amostra ajustam-se bem à distribuição de probabilidade a 5% de significância, caso contrário, a hipótese é rejeitada.

v) Escolha da *fdp* de melhor ajuste às distribuições de frequência observadas, para estimativa da  $P$  e  $ETo$  prováveis (com a *fdp* de melhor ajuste), para os 37 decêndios dos anos analisados. Como algumas das *fdp*'s analisadas não admitem valores nulos adotou-se o conceito de distribuição mista (ASSIS et al., 1996):

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

Sendo:  $F(p)$  – função cumulativa de probabilidade da distribuição mista (%);  $P_o$  – probabilidade de ocorrência de decêndios com valor igual a zero (%) ou com valores menores que 1 mm decêndio<sup>-1</sup>;  $D(p)$  – probabilidade estimada com a função distribuição cumulativa teórica de melhor ajuste, cujos parâmetros foram determinados na ausência de decêndios com valor igual a zero (%).

vi) Determinação dos valores prováveis decendiais de  $P$  à 75%, e  $ETo$  a 25% de probabilidade para cada localidade do *grid* regular (FIGURA 2.2).

$$P_{75\%} = P(P_{75\%} \in P \mid P_i \geq P_{75\%}) = 75\%$$

$$ETo_{25\%} = P(ETo_{25\%} \in ETo \mid ETo_i \geq ETo_{25\%}) = 25\%$$

Logo, para cada decêndio, a  $P_{75\%}$  refere-se ao valor de  $P_i$  que tenha 75% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da precipitação  $P_i$  ocorrer três vezes a cada quatro anos ou com tempo de retorno  $T = 1,33$  anos, em média. Para cada decêndio, a  $ETo_{25\%}$  refere-se ao valor de evapotranspiração  $ETo_i$  que tenha 25% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da evapotranspiração  $ETo_i$  ocorrer uma vez a cada quatro anos ou com tempo de retorno  $T = 4$  anos, em média (GURSKI, 2018).

#### 2.4.4 Espacialização dos valores prováveis para o Estado do Piauí

Com os valores decendiais prováveis calculados foram gerados mapas de  $ETo$  e  $P$  prováveis para todo o Estado do Piauí, com a média dos valores nas estações do verão, outono, inverno e primavera. Os mapas foram gerados realizando-se a

interpolação dos dados prováveis obtidos de  $ET_o$  e  $P$ , com o programa *Surfer* 8.0. O método empregado para a interpolação dos dados foi a *krigagem* ordinária.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos 12.210 testes de aderência realizados para cada variável climática analisada (precipitação e evapotranspiração de referência) permitiram verificar a ocorrência de diferentes *fdp*'s nos ajustes com os testes de aderência. Na TABELA 2.1 encontram-se as frequências das funções de densidade de probabilidade mais indicadas para estimar a  $P$  e  $ET_o$ .

Verificou-se que a *fdp* Gama foi a que melhor se ajustou aos dados de precipitação, correspondendo a 67% dos decêndios, seguido da *fdp* Exponencial (21%), Normal (10%), Triangular (2%) e Uniforme (0,3%). Junqueira Júnior et al. (2007) destacam que a *fdp* Gama tem se mostrado adequada para estudos referentes à precipitação provável. Castro et al. (2002) comentam que variáveis sem limite inferior e superior são bem representadas pela *fdp* Normal. Mesmo apresentando limite inferior, a  $ET_o$  ajustou-se bem a *fdp* Normal (52%), seguido da *fdp* Gama (34%), Triangular (11%), Uniforme (2%), sendo que não foram observados nenhum ajuste à *fdp* Exponencial. Vários estudos apontam as *fdp*'s Normal e Gama como as que melhor se ajustam à  $ET_o$  (SILVA et al., 1998; SOUZA et al., 2014; GURSKI et al., 2017).

Em estudo com a precipitação pluviométrica provável em municípios piauiense, Andrade Júnior e Bastos (1997) destacaram que a *fdp* Normal não se ajustou aos dados de precipitação dos meses mais secos, que correspondem a junho, julho, agosto e setembro (17° ao 28° decêndios). Tais conclusões estão de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, em que a *fdp* Normal teve pouco percentual em relação ao total.

TABELA 2.1 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (E – EXPONENCIAL; G – GAMA; N – NORMAL; T – TRIANGULAR; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA PRECIPITAÇÃO ( $P$ ) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_0$ ), PARA O ESTADO DO PIAUÍ.

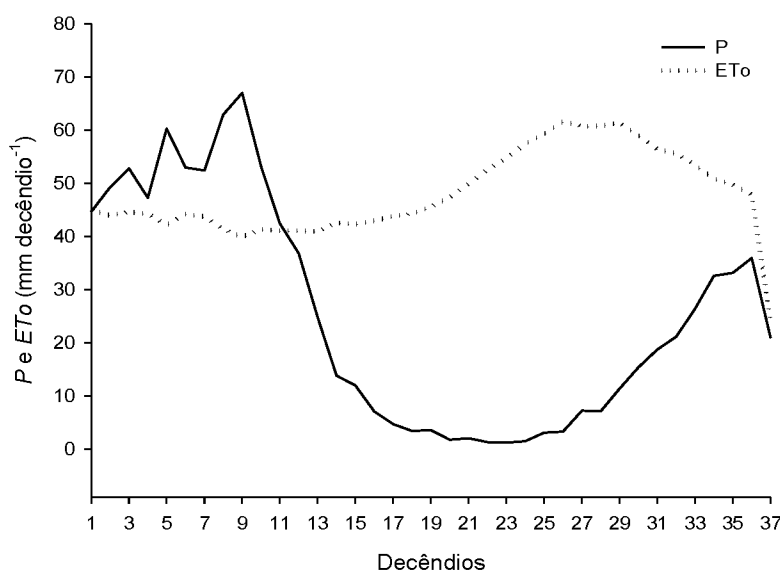
Decêndios	----- Melhor ajuste para $P$ -----					----- Melhor ajuste para $ET_0$ -----				
	N	T	G	E	U	N	T	G	E	U
1 (01/01 a 10/01)	28	6	236	60	0	109	37	184	0	0
2 (11/01 a 20/01)	28	7	204	91	0	141	40	149	0	0
3 (21/01 a 30/01)	16	0	265	49	0	267	24	39	0	0
4 (31/01 a 09/02)	58	10	165	96	1	208	7	107	0	8
5 (10/02 a 19/02)	80	10	214	26	0	133	41	145	0	11
6 (20/02 a 01/03)	212	27	54	29	8	26	12	292	0	0
7 (02/03 a 11/03)	141	18	108	55	8	72	46	209	0	3
8 (12/03 a 21/03)	113	20	171	24	2	197	10	117	0	6
9 (22/03 a 31/03)	111	14	180	25	0	226	15	85	0	4
10 (01/04 a 10/04)	6	3	226	95	0	180	3	122	0	25
11 (11/04 a 20/04)	27	18	134	145	6	104	7	182	0	37
12 (21/04 a 30/04)	17	1	143	168	1	182	22	126	0	0
13 (01/05 a 10/05)	7	0	245	78	0	183	18	129	0	0
14 (11/05 a 20/05)	2	0	281	47	0	157	24	132	0	17
15 (21/05 a 30/05)	11	1	290	28	0	178	25	127	0	0
16 (31/05 a 09/06)	5	1	288	36	0	147	10	141	0	32
17 (10/06 a 19/06)	8	0	303	19	0	168	48	107	0	7
18 (20/06 a 29/06)	3	1	269	57	0	126	53	148	0	3
19 (30/06 a 09/07)	7	0	278	45	0	132	98	87	0	13
20 (10/07 a 19/07)	11	0	258	61	0	197	61	72	0	0
21 (20/07 a 29/07)	39	1	242	46	2	178	45	98	0	9
22 (30/07 a 08/08)	30	1	238	55	6	149	55	105	0	21
23 (09/08 a 18/08)	44	1	209	73	3	166	62	91	0	11
24 (19/08 a 28/08)	16	2	239	70	3	183	56	84	0	7
25 (29/08 a 07/09)	8	2	263	57	0	174	58	90	0	8
26 (08/09 a 17/09)	10	1	274	43	2	195	55	69	0	11
27 (18/09 a 27/09)	6	2	214	108	0	184	115	27	0	4
28 (28/09 a 07/10)	4	0	246	80	0	209	65	55	0	1
29 (08/10 a 17/10)	2	1	239	88	0	221	52	57	0	0
30 (18/10 a 27/10)	3	2	286	39	0	208	43	69	0	10
31 (28/10 a 06/11)	14	15	239	62	0	174	30	122	0	4
32 (07/11 a 16/11)	13	4	208	105	0	206	27	92	0	5
33 (17/11 a 26/11)	35	6	195	94	0	208	24	90	0	8
34 (27/11 a 06/12)	10	4	216	100	0	191	21	117	0	1
35 (07/12 a 16/12)	33	10	231	56	0	262	11	51	0	6
36 (17/12 a 26/12)	2	0	217	111	0	225	52	52	0	1
37 (27/12 a 31/12)	13	2	147	168	0	129	18	174	0	9
Soma	1173	191	8215	2589	42	6395	1390	4143	0	282
Porcentagem (%)	10	2	67	21	0,3	52	11	34	0	2

FONTE: O autor (2018)

As *fdp*'s Gama e Exponencial aderiram melhor às séries decendiais de  $P$ , enquanto Normal e Gama foram melhores para séries decendiais de  $ET_0$ . Mesmo em climas Cfa e Cfb, resultados semelhantes também foram encontrados por Gurski et al. (2017), analisando a precipitação e evapotranspiração de referência decendial provável para o Estado do Paraná.

Os valores médios decendiais no período de 36 anos estão apresentados na FIGURA 2.3. Observou-se que o Estado do Piauí apresentou dois períodos bem definidos, correspondendo com a natureza dos eventos de  $P$  e  $ET_0$ . A  $ET_0$  é superior no período mais seco entre o 11° (11/04 a 20/04) e 37° (27/12 a 31/12) decêndios, e a  $P$  é superior durante o período mais chuvoso, entre o 1° (01/01 a 10/01) e 10° (01/04 a 10/04) decêndios, aproximadamente. Observou-se que a partir do 12° (21/04 a 30/04) decêndio a  $ET_0$  foi superior à precipitação até o 37° (27/12 a 31/12) decêndio, correspondendo a maior probabilidade de ausência de precipitação ( $P = 0$ ), caracterizando a tendência das variáveis na classificação climática de Köppen, para o Estado do Piauí.

FIGURA 2.3 – VALORES MÉDIOS DECENDIAIS DE  $P$  E  $ET_0$ , NOS 37 DECÊNDIOS DO ANO, CONSIDERANDO PERÍODO DE 36 ANOS, NO ESTADO DO PIAUÍ.



FONTE: O autor (2018)

A tendência verificada nas análises realizadas com os valores médios decendiais de  $P$  e  $ET_0$  (FIGURA 2.3) é bem caracterizada nas regiões de clima semiárido, pela ocorrência de grande déficit hídrico, em consequência das chuvas

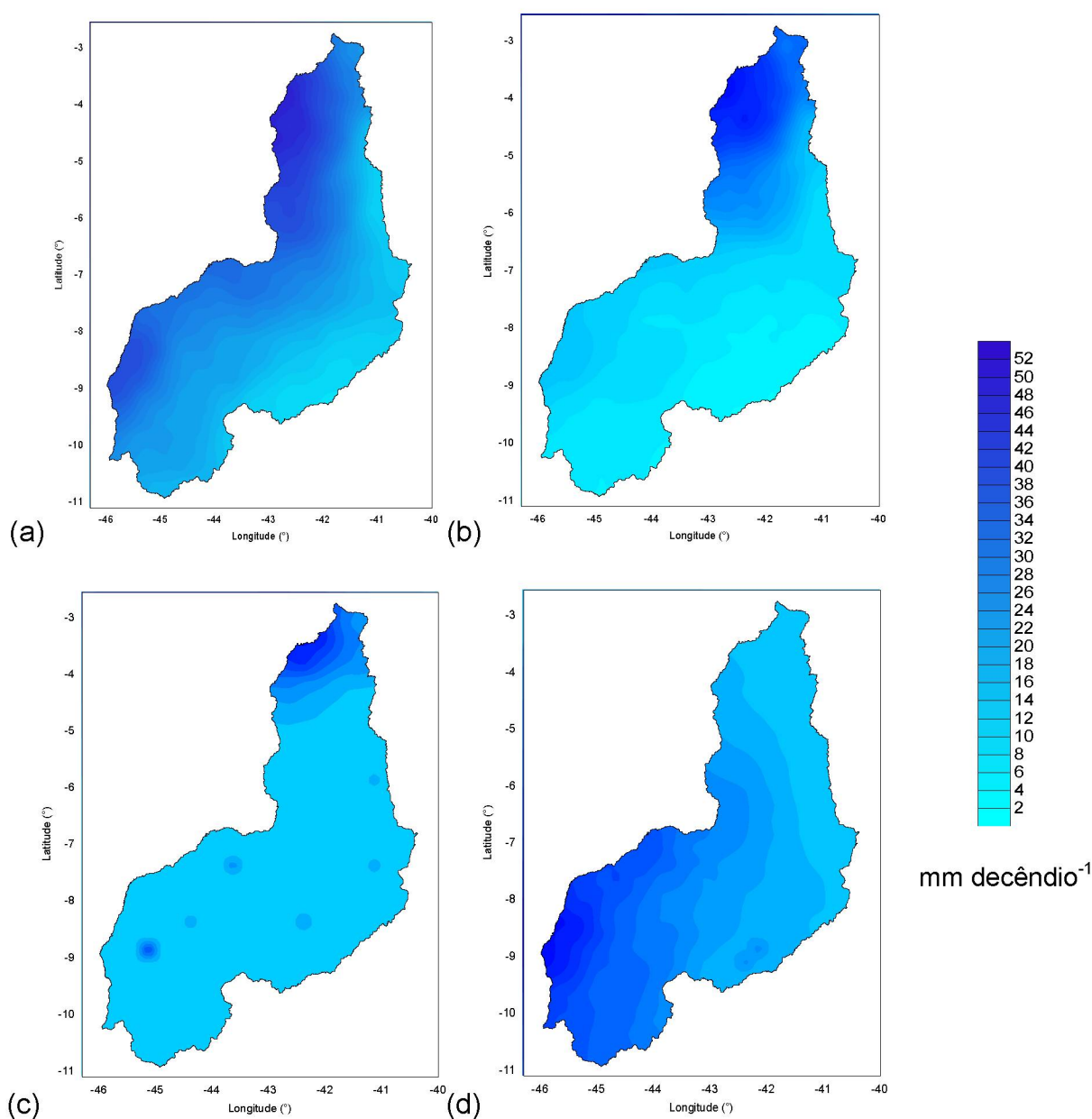
irregulares, apresentando poucos registros com precipitação superior a 1 mm decêndio<sup>-1</sup>. Silva et al. (2016) observaram tendência similar, analisando a *ETo* no Estado do Piauí, em curto (meses) período de tempo (dados limitados). A redução da *P* é indicativo da ocorrência de períodos de veranicos, que pode comprometer o desenvolvimento das culturas, refletindo na produção agrícola e econômica. Os resultados obtidos apontam a distribuição e concentração da *P* em determinado período, indicando a importância de estudos probabilísticos com as variáveis climáticas. A existência e utilização de valores prováveis decendiais constituem bases fundamentais para o manejo eficiente e satisfatório das culturas, em especial para identificar a melhor época de semeadura, evitando a deficiência hídrica das culturas e perdas na produtividade.

O Estado do Piauí apresenta aspectos climáticos extremamente variáveis. Os resultados obtidos com os valores decendiais (mm decêndio<sup>-1</sup>) da *P* a 75% de probabilidade (FIGURA 2.4), correspondem à probabilidade da precipitação *P*; ocorrer três vezes a cada quatro anos ou com tempo de retorno  $T = 1,33$  anos, em média.

A precipitação pluviométrica concentra-se nas estações verão e outono na região litorânea e centro-norte (FIGURA 2.4ab). Os valores mais elevados de umidade relativa do ar (70% a 75%) também ocorrem justamente nas áreas onde predominam a maior concentração da precipitação no Estado do Piauí, apresentando verão chuvoso e inverno seco conforme a classificação de Köppen (ÁLVARES, 2013). Durante a primavera, na região sul/sudoeste do Estado (FIGURA 2.4d) tem-se a tendência bem característica da região, ocorrendo chuvas ocasionais e período favorável para o plantio da cultura da soja na região, se estendendo até o verão. Apenas em uma localidade (norte) no inverno (FIGURA 2.4c) verificou-se risco de baixa precipitação com chuvas inferiores a 2 mm decêndio<sup>-1</sup>.

Verificou-se nas análises que os eventos de *P* durante as estações verão e primavera (sul/sudeste) correspondem exatamente nas regiões mais promissoras, com maiores áreas de produção agrícola (CONAB, 2016). São regiões que apresentam alta probabilidade de armazenamento de água no solo devido aos maiores volumes de precipitação, reduzindo a possibilidade de deficiência hídrica.

FIGURA 2.4 – PRECIPITAÇÃO DECENAL MÉDIA PROVÁVEL A 75% ( $P_{75\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>) NO ESTADO DO PIAUÍ, NAS ESTAÇÕES: a) VERÃO; b) OUTONO; c) INVERNO; E, d) PRIMAVERA.

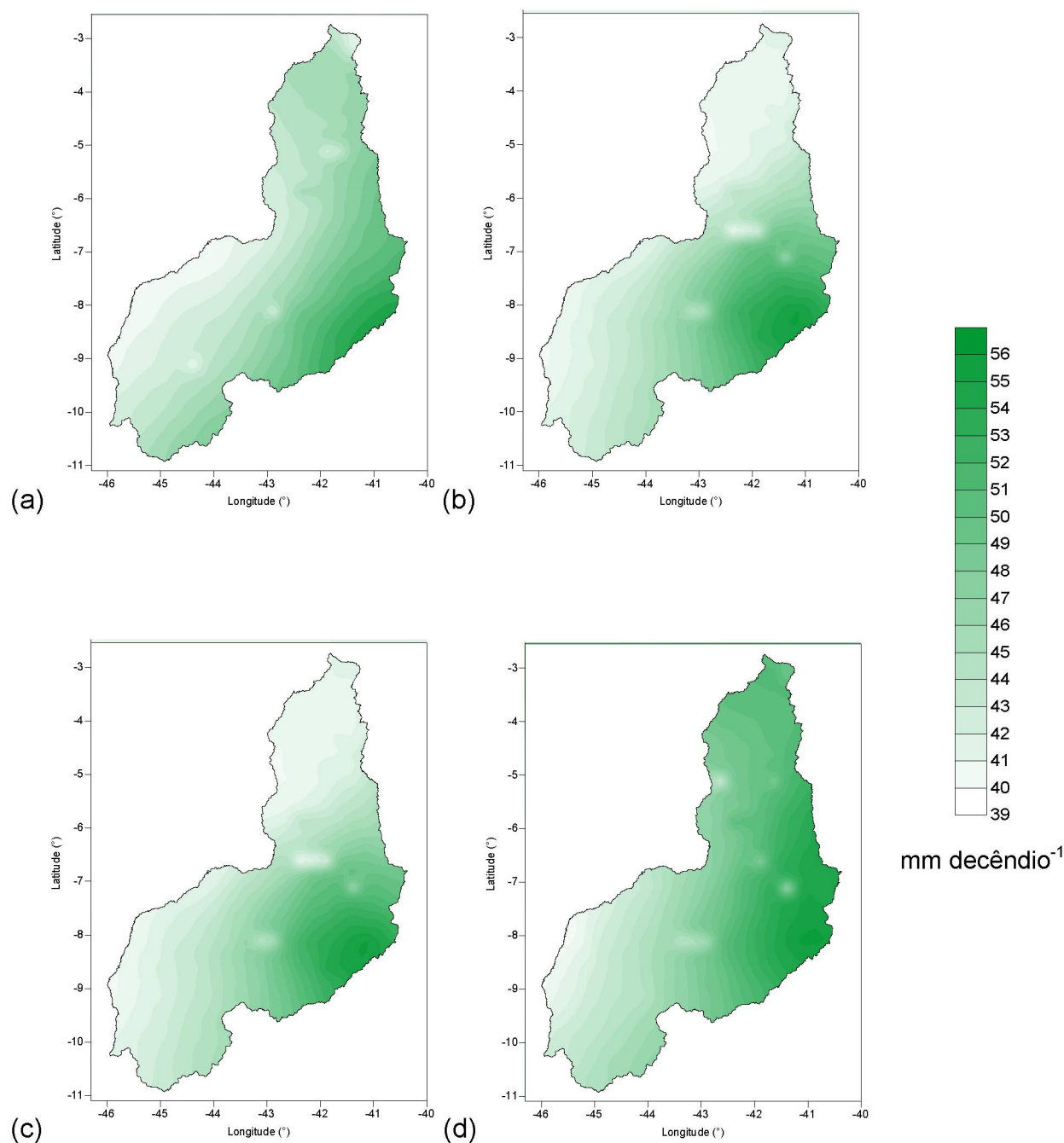


FONTE: O autor (2018)

A  $ET_{0.25\%}$  refere-se ao valor de evapotranspiração  $ET_{0i}$  que tenha 25% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da evapotranspiração  $ET_{0i}$  ocorrer uma vez a cada quatro anos ou com tempo de retorno  $T = 4$  anos, em média. Houve crescimento nos valores (mm decêndio<sup>-1</sup>) da  $ET_{0}$  total média provável, da região sudoeste para o sudeste do Estado (FIGURA 2.5).



FIGURA 2.5 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DECENAL MÉDIA PROVÁVEL A 25% ( $ET_{0.75\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>) NO ESTADO DO PIAUÍ, NAS ESTAÇÕES: a) VERÃO; b) OUTONO; c) INVERNO; E, d) PRIMAVERA.



FONTE: O autor (2018)

Nas quatro estações analisadas, os maiores valores de  $ET_{0.25\%}$  ocorreram na área de abrangência da região semiárida (leste/sudeste; FIGURA 2.5). São regiões que possuem alta incidência de energia solar, e o aumento da temperatura do ar contribui para a ocorrência da  $ET_0$ . Além disso, a região é bem seca, apresentando

precipitação pluviométrica entre 400 mm a 600 mm por ano (ANDRADE JÚNIOR et al., 2009), agravando os problemas hídricos para o consumo humano, animal e destinado à agricultura. Gomes et al. (2005) em estudo mensal da *ETo* nos municípios do Estado do Piauí concluíram que as estimativas da *ETo* apresentam dependência da localização geográfica (latitude e longitude) e topografia local (altitude).

As variações observadas para a evapotranspiração de referencia durante as estações do ano justificam o uso de teorias de probabilidades para a obtenção de valores prováveis em vez de utilizar apenas dados médios.

O resultado da *ETo* proporciona deficiência hídrica na região semiárida e balanço hídrico anual negativo. A *ETo* média provável anual pode variar conforme varia a temperatura média do ar e o regime de chuvas da região em questão, sendo também um reflexo natural da variação espacial, correspondendo com os períodos de ocorrência entre a região chuvosa e seca no Estado.

Os parâmetros das *fdp*'s de melhor ajuste para as componentes hídricas *P* e *ETo* obtidos para o *grid* regular de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , contendo os 330 pontos no estado do Piauí, foram dispostos em uma planilha eletrônica (APÊNDICE 2) para calcular os valores (*P* e *ETo*) para qualquer nível de probabilidade entre 1 e 99%.

Os mapas geoespacializados dos valores médios prováveis da *P* e *ETo* durante as estações do ano possibilitam analisar mais consistentemente as variáveis, sendo notadamente útil para o planejamento da agricultura irrigada.

## 2.6 CONCLUSÕES

As *fdp*'s Gama e Exponencial apresentaram melhor ajuste as séries de valores decendiais de *P*, e as *fdp*'s Normal e Gama ajustaram-se melhor as séries de valores decendiais de *ETo*.

A  $P_{75\%}$  foi maior durante as estações verão e outono na região litorânea e centro-norte. Os maiores valores de  $ETo_{25\%}$  ocorre na região leste/sudeste, independente da estação do ano.

## 2.7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.

ÁLVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.J.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, 2013; p. 11-728, 2013.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SENTELHAS, P. C.; SILVA, A. A. G. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p.63-68, jan. 2003.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A. **Precipitação pluviométrica provável em municípios do cerrado piauiense**. Teresina, 22p, 1997.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SILVA F. A. M.; LIMA M. G.; AMARAL J. A. B. Zoneamento de aptidão climática para o algodoeiro herbáceo no Estado do Piauí. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 175-184, abri./jun. 2009.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SILVA, C. O.; SOUSA V. F.; RIBEIRO V. Q. Avaliação de métodos para estimativa de evapotranspiração de referência no Estado do Piauí. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n.1, p. 181-190, ago. 2017.

ASSIS, F. N.; ARRUDA, H. V.; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas, 1996.

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**, Campina Grande, v. 13, p. 906-915, abr. 2009.

BARRETO, H. B. F.; PEREIRA, G. M.; SANTOS W. O.; FREIRE, F. G. C.; MAIA P. M. E. Avaliação de funções de probabilidade e relação-intensidade-duração-frequência para precipitação extrema em Nepomuceno-MG. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 08, n. 02, p.118–127, mai./ago. 2015.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. São Paulo: Saraiva, 2010.

CAMARGO, A. P.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251–257, jul. 1999.

CASTRO, M. C.; FARIA, M. A.; SILVA, A. M. Sistema computacional para a determinação da lâmina ótima econômica em irrigação pressurizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 372-378, jul. 2002.

CEPRO. Fundação Centro de Pesquisas Econômicas e Sociais do Piauí. Diagnóstico e diretrizes para o setor mineral do Estado do Piauí. 2004. Disponível

em: <[http://www.cepro.pi.gov.br/download/200804/CEPRO16\\_6695f7c23c.pdf](http://www.cepro.pi.gov.br/download/200804/CEPRO16_6695f7c23c.pdf)>.  
Acesso em: 13 ago. 2017.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Oitavo levantamento. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos**, Brasília, v. 3, n. 8, p.1-134, maio 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 maio 2016.

DENSKI, A. P. N.; BACK, A. J. Aderência de distribuições de probabilidade de evapotranspiração de referência decendial. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 17, jul./dez. 2015.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. Rome, 1977.

GOMES, A. A. N.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; MEDEIROS, R. M. Evaporação de referência mensal para o Estado do Piauí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 560-564, mar. 2005

GURSKI, B. C. **Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná**. 132 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; BARROCA, M. V.; XAVIER, A. C.; JERSZURKI, D. **Evapotranspiração de referência e precipitação pluviométrica prováveis no Estado do Paraná**. In: V Congresso Online - Agronomia, São Paulo, 2017.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 2010.

JENSEN, M. E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York: ASCE, p. 215.1974.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, A. W. P. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba – PR. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 33, n. 2, p.118-129, jul./jan. 2015.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. C. R. Expanding the geography of evapotranspiration: An improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. **PLoS ONE**, v. 12, n. 6, p. 1-1. 2017.

JUNQUEIRA JÚNIOR, 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, v. 31, n. 3, p. 842-850, maio/jun. 2007.

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

PRUITT, W. O.; OETTINGEN, S.; MORGAN, D. L. Central California evapotranspiration frequencies. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 98, n. 2, p. 177-184, 1972.

SAAD, J. C. C.; SCALOPPI, E. J. Frequência de distribuição de evapotranspiração para dimensionamento de sistemas de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: ABID, 1988. p. 1037-1052.

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 precipitação em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 135-142, abr./jun. 2011.

SILVA, C. O.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUSA, V. F.; RIBEIRO, V. Q.; SENTELHA, P. C. Estimativa da evapotranspiração de referência com dados climáticos limitados no estado do Piauí. **Revista Espacios**, França, v. 37, n.23, p. 12, mar./abr. 2016.

SILVA, F. C.; FIETZ, C. R.; FOLEGATTI, 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**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 284-286, 1998.

SOUZA, J. M. L. **Ciclo da água na agricultura: fundamentos para o estudo do sistema solo-planta-atmosfera**. Curitiba: Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2017.

SOUZA, J. M. L. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados**: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: Plataforma Moretti /DSEA/SCA/UFPR, 2018.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; DAMAZIO, E. C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 48, n.7, p. 693-702, out./jun. 2013.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; GOMES, S. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 2, p. 279-291, abr./jun. 2014.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, J. P.; PAULA, A.; GUIMARAES, D. U. G.; BARROSO N.I.S. Estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do Estado da Bahia. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, p.136–143, mar./jun. 2012.

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

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659. 2016.

### 3 CAPÍTULO II – BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PROVÁVEL PARA A CULTURA DA SOJA NO ESTADO DO PIAUÍ

#### 3.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho calcular o balanço hídrico agrícola (*BHA*) diário para a cultura da soja no Estado do Piauí para uma série de anos, estabelecer os parâmetros estatísticos de cinco funções de densidade de probabilidade (*fdp*) ajustadas aos valores decendiais de evapotranspiração real (*ETr*), deficiência hídrica (*Def*) e armazenamento de água no solo (*S*) para a cultura da soja, bem como estabelecer mecanismos que permitam determinar os valores da *ETr*, *Def* e *S* para qualquer nível de probabilidade, com as *fdp*'s de melhor ajuste. A série de dados climáticos (1980 a 2015; 36 anos) são proveniente da Agência Nacional de Águas, Instituto Nacional de Meteorologia e do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo. Os dados climáticos foram espacializados com o melhor interpolador, obtido por validação cruzada, em *grid* regular de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , gerando 330 pontos para análise, cobrindo todo o Estado do Piauí. A evapotranspiração de referência (*ETo*) foi calculada diariamente com o método de Penman-Monteith. O *BHA* foi calculado diariamente com o programa AquaCrop, obtendo-se como saída dados diários de *ETr*, *Def* e *S*. Os dados diários das componentes foram somados e agrupados em dez dias (decêndios) totalizando 37 decêndios por ano. Foram realizadas distribuições de frequência e aplicados testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade aos valores decendiais para realizar o ajustamento às funções densidade de probabilidade (*fdp*'s: Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme) para cada localidade. Determinou-se os valores decendias prováveis de  $S_{75\%}$ ,  $ETr_{25\%}$  e  $Def_{25\%}$ . As funções densidade de probabilidade (*fdp*'s) Normal e Gama são as que melhor se ajustaram às componentes de saída do balanço hídrico agrícola (*Def*, *ETr* e *S*). Considerando todo o Estado do Piauí obteve-se valores prováveis médios de  $ETr_{25\%} = 21,63 \text{ mm decêndio}^{-1}$ ,  $Def_{25\%} = 31,62 \text{ mm decêndio}^{-1}$  e  $S_{75\%} = 84,0 \text{ mm}$ . A matriz dos parâmetros das *fdp*'s de melhores ajuste permitiu o cálculo das componentes hídricas (*Def*, *ETr* e *S*) para qualquer nível de probabilidade, contribuindo para tomada de decisão e redução de incertezas do cultivo da soja no Estado do Piauí.

Palavras-chave: Disponibilidade de água. Relações hídricas. Função de densidade probabilidade. AquaCrop. Modelagem.

### 3.2 ABSTRACT

The purpose of this study was to calculate the daily agricultural water balance (*AWB*) for the soybean crop in the Piauí State for a series of years, to establish the statistical parameters of five probability density functions (*pdf*) adjusted to the ten-days values of real evapotranspiration (*ETr*), water deficiency (*Def*) and soil water storage (*S*) for the soybean crop, as well as establishing a mechanism to determine the values of *ETr*, *Def* and *S* for any level of probability, with the best fit *pdf*'s. The series of climatic data (1980 to 2015; 36 years) came from the National Water Agency and National Institute of Meteorology. The climatic data were spatialized with the best interpolator, obtained by cross validation, in a regular grid of  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , generating 330 points for analysis, covering the Piauí State. The reference evapotranspiration (*ETo*) was calculated daily using the Penman-Monteith method. The *AWB* was calculated daily with the AquaCrop program, obtaining as output daily data of *ETr*, *Def* and *S*. The daily data of the components were summed and grouped in ten-days. Frequency distributions were applied and Kolmogorov-Smirnov adhesion tests at 5% probability at the decennial values to perform the adjustment to the probability density functions (*pdf*'s: Exponential, Gamma, Normal, Triangular and Uniform) for each locality. The probable of ten-days values of  $S_{75\%}$ ,  $ETr_{25\%}$  and  $Def_{25\%}$  were determined. The probability density functions (*pdf*'s) Normal and Gamma were the best fit for output components of the agricultural water balance (*Def*, *ETr* and *S*). Considering the entire Piauí State, average values of  $ETr_{25\%} = 21.6 \text{ mm}^{-1}$  10-day period,  $Def_{25\%} = 31.63 \text{ mm}^{-1}$  10-day period and  $S_{75\%} = 84.0 \text{ mm}$  were obtained. The matrix of the best fit *pdf* parameters allowed the computation of the water components (*Def*, *ETr* and *S*) for any level of probability, contributing to decision making and reducing uncertainties of soybean cultivation in the Piauí State.

Keywords: Availability of water. Water relations. Probability density function. AquaCrop. Modeling.

### 3.3 INTRODUÇÃO

A produção de soja ocupa posição de destaque na agricultura piauiense, sendo cultivada predominantemente em regime de sequeiro, principalmente na região do Cerrado piauiense (EVANGELISTA et al., 2017). A região apresenta precipitação média anual variando de 800 a 1400 mm (ANDRADE JÚNIOR et al., 2007). Apesar do elevado índice pluvial anual, o risco climático que a cultura da soja está sujeita é acentuado, devido à irregularidade na distribuição de chuvas, nos períodos de veranicos, em que a redução de chuvas têm se intensificado nos últimos quatro anos na região de Cerrados (EVANGELISTA et al., 2017).

Em cenário climático com irregularidade na distribuição de chuvas, o estudo do balanço hídrico agrícola constitui ferramenta fundamental no processo de tomada de decisão. Sendo assim, diversos trabalhos têm sido realizados no Piauí, com o propósito de entender a tendência e influência das variáveis ambientais na produtividade, e das relações hídricas no manejo agrícola (ANDRADE JÚNIOR et al., 2001; ANDRADE JÚNIOR et al., 2003; GOMES et al., 2005; ANDRADE JÚNIOR et al., 2017).

Previsões meteorológicas confiáveis e prolongadas podem contribuir para melhorar a estimativa da produtividade agrícola. Em geral, a eficiência do sistema de previsão de rendimento de culturas está relacionada com a capacidade dos modelos atmosféricos para prever a precipitação, temperatura e outras variáveis usadas como entrada por modelos de culturas. Estudos demonstraram que os desempenhos dos modelos para prever o rendimento das culturas melhoram quando previsões climáticas são usadas, principalmente quando são abordadas incertezas nas previsões, corrigindo os erros sistemáticos que afetam as variáveis climáticas previstas (MARTINS et al., 2018).

O desenvolvimento e a utilização de modelos de simulação do balanço hídrico voltado às atividades agrícolas têm se intensificado nos últimos anos. O AquaCrop, desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), requer menor número de parâmetros e dados de entrada. Ao mesmo tempo, o modelo fornece bom equilíbrio entre robustez, simplicidade e precisão de produção, podendo ser usado para inúmeras culturas (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009). O AquaCrop tem sido aplicado a diferentes culturas e ambientes (HSIAO et



al., 2009; RAES et al., 2009; TSEGAY et al., 2012; JIN et al., 2014), bem como no desenvolvimento de estratégias de manejo de irrigação para melhorar o rendimento das culturas e a eficiência do uso da água (ANDARZIAN et al., 2011; ZINYENGERE et al., 2011; ABRHA et al., 2012; SHRESTHA et al., 2013; SILVA et al., 2018).

O modelo AquaCrop já foi aplicado à várias culturas anuais, mas apenas algumas aplicações analisaram sua resposta em relação à água do solo e à evapotranspiração. Farahani et al. (2009) realizaram estudo para o algodão, Katerji et al. (2013) para tomate, Paredes et al. (2014) para o milho, Gurski (2018) para soja e milho, no Estado do Paraná, e Anjos (2011) para o milho em município do Estado de Alagoas.

A importância do *BHA* como ferramenta para avaliar as saídas e entradas de água no solo e definição dos períodos mais prováveis de deficiência hídrica para a cultura está relacionada ao conhecimento dos fatores que o compõem (evapotranspiração, precipitação, drenagem interna ou ascensão capilar), bem como do conhecimento das características da planta (CINTRA et al., 2000). A disponibilidade hídrica durante o ciclo é a principal limitação da produtividade para a cultura da soja, independente do ciclo da cultivar, época de semeadura e local de plantio. O clima e tipo de solo são as variáveis que mais influenciam na disponibilidade hídrica (EVANGELISTA et al., 2017).

O Estado do Piauí possui características climáticas distintas. Estudos prováveis da distribuição das componentes hídricas demonstram que sua ocorrência depende de fenômenos aleatórios, influenciados pela localização geográfica de uma região, o que contribui diretamente nas atividades econômicas, em especial na agricultura (ANDRADE JÚNIOR et al., 2007; SOUZA et al., 2013; GURSKI, 2018).

Diversos autores recomendam a utilização das componentes hídricas prováveis no dimensionamento de projetos agrícolas, uma vez que o uso de valores médios pode resultar em super ou subdimensionamento (OLIVEIRA; CARVALHO, 2003; SAMPAIO et al., 2006; SOCCOL et al., 2010; SOUZA et al., 2013). Portanto, a realização de estudos sobre a distribuição das componentes hídricas torna possível a realização de planejamento regional quanto às culturas a serem exploradas.

O Estado do Piauí vem sendo impulsionado pela expansão da atividade agrícola, o que viabilizou o surgimento de novos polos de fronteira agrícola. Neste

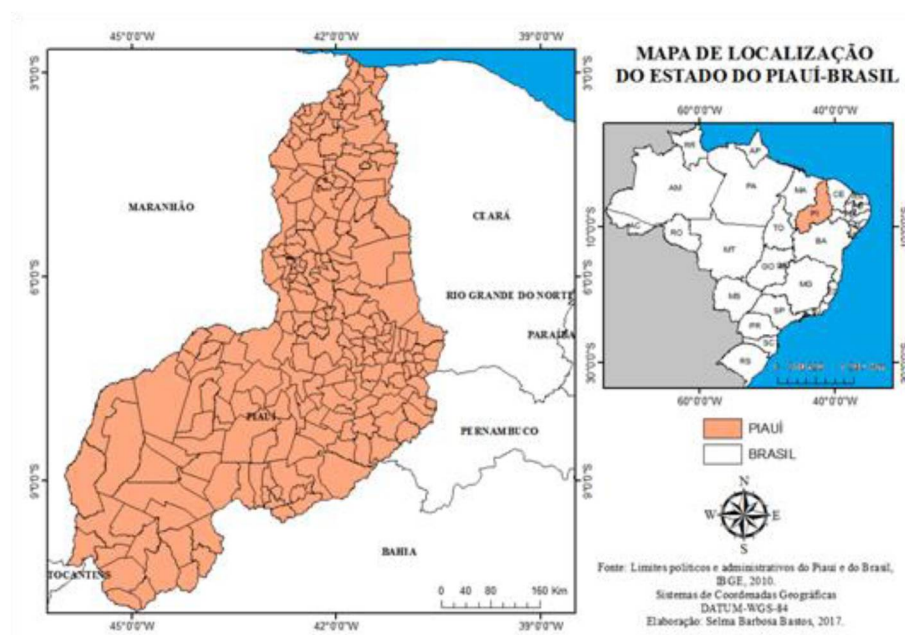
contexto, teve-se por objetivo no presente trabalho calcular o balanço hídrico agrícola (*BHA*) diário para a cultura da soja no Estado do Piauí para uma série de anos, estabelecer os parâmetros estatísticos de cinco funções de densidade de probabilidade (*fdp*) ajustadas aos valores decendiais de evapotranspiração real (*E<sub>Tr</sub>*), deficiência hídrica (*Def*) e armazenamento de água no solo (*S*) para a cultura da soja, bem como estabelecer mecanismos que permitam determinar os valores da *E<sub>Tr</sub>*, *Def* e *S* para qualquer nível de probabilidade, com as *fdp*'s de melhor ajuste.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.4.1 Caracterização da área de estudo

O Estado do Piauí está localizado na região Nordeste do Brasil (FIGURA 3.1). Possui 224 municípios, abrangendo área aproximada de 251.529,2 km<sup>2</sup>, correspondendo a 16,2% da área nordestina e 2,95% da área nacional. O Piauí limita-se ao norte com o Oceano Atlântico, ao sul com os Estados da Bahia e Tocantins, a leste com os Estados do Ceará e Pernambuco, e a oeste com o Estado do Maranhão (CEPRO, 2004).

FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO E DIVISÃO GEOPOLÍTICA DO ESTADO DO PIAUÍ.



FONTE: Adaptado do IBGE (2010)

O Estado do Piauí tem dois tipos climáticos, conforme a classificação de Álvares et al. (2013): *Aw* e *BSh*. O clima tropical quente e úmido (*Aw*) apresenta chuvas no verão e inverno seco, com precipitação anual acima de 800 mm. O clima semi-árido seco e quente (*BSh*) apresenta chuvas de verão e inverno seco, com precipitação anual inferior a 500 mm e evapotranspiração potencial anual superior à precipitação anual.

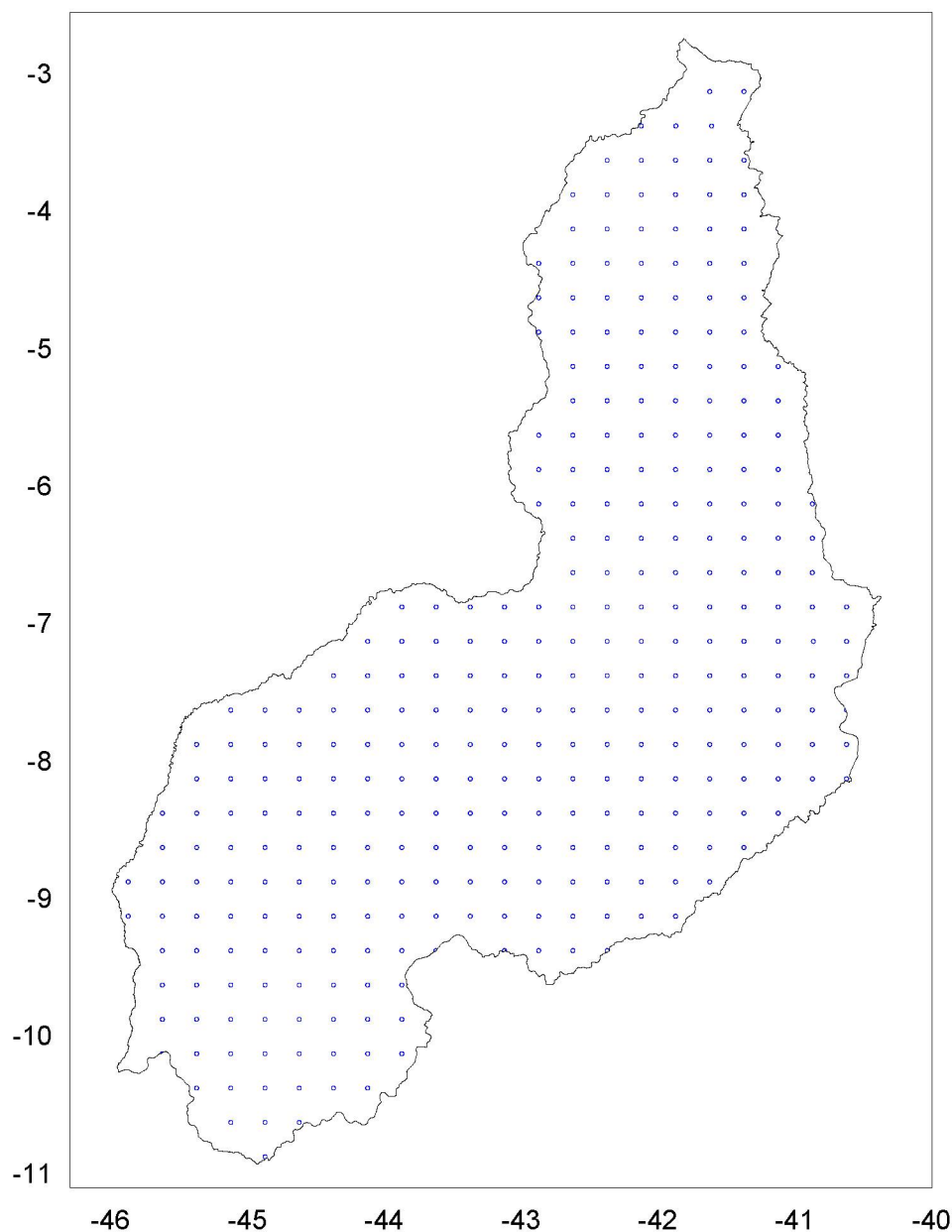
Os valores de precipitação, temperatura média do ar e umidade relativa do ar são extremamente variáveis nas diversas regiões do Estado do Piauí. A precipitação tem máximos entre 1600 mm e 1800 mm na região centro-norte, e entre 400 mm a 600 mm na região sudeste (semiárido). Os valores de temperatura variam entre 28 °C e 30 °C na região centro-norte, e entre 26 °C a 28 °C nas regiões sul e leste, em que predominam formações de chapadas e serras, com altitudes mais elevadas. As maiores umidades relativas do ar (70% a 75%) predominam na região centro-norte, e os menores (60% a 65%) na região sudeste (ANDRADE JÚNIOR et al., 2009).

### 3.4.2 Dados meteorológicos e espacialização

O *grid* de dados climáticos espacializados utilizados para a realização do presente trabalho foi constituído em estudo anterior, realizado e disponibilizado por Xavier et al. (2016). Os dados de precipitação pluviométrica utilizados nas análises foram medidos diariamente em pluviômetros, em estações meteorológicas convencionais e automáticas no período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2015, totalizando série histórica de 36 anos. As fontes dos dados foram o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional das Águas (ANA) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE). A tabulação e organização dos dados fornecidos foram processadas em planilha eletrônica. As variáveis meteorológicas temperatura máxima ( $T_{max}$ ; °C), mínima ( $T_{min}$ ; °C) e média ( $T_{med}$ ; °C) do ar, umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), velocidade do vento a 2 m de altura ( $u_2$ , m s<sup>-1</sup>), precipitação pluviométrica ( $P$ ; mm), brilho solar diário ( $n$ ; horas) foram provenientes de estações meteorológicas convencionais. As leituras de radiação solar incidente diária ( $R_s$ , MJ m<sup>-2</sup>) foram provenientes do banco de dados das estações automáticas do INMET. Os dados da ANA e DAEE foram limitados à precipitação pluviométrica ( $P$ ).

Utilizando análise de validação cruzada, Xavier et al. (2016) determinaram que a ponderação da distância inversa e ponderação de distância angular foram os melhores métodos de interpolação para todos variáveis que testaram. Os dados meteorológicos foram espacializados em *grid* regular na resolução de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , cobrindo todo o Estado do Piauí. Como resultado obteve-se dados meteorológicos ( $P$ ,  $T_{m\acute{a}x}$ ,  $T_{m\acute{i}n}$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $U_2$ ,  $n$ ,  $Rs$ ) diários (36 anos), para o *grid* regular abrangendo 330 pontos para o Estado do Piauí (FIGURA 3.2).

FIGURA 3.2 – GRID REGULAR  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , CONTENDO OS 330 PONTOS NO ESTADO DO PIAUÍ, EM QUE FORAM ANALISADOS OS VALORES DIÁRIOS DE  $ET_0$  E  $P$ , AGRUPADOS EM DECÊNDIOS.



FONTE: O autor (2018)

### 3.4.3 Cálculo do balanço hídrico agrícola (*BHA*)

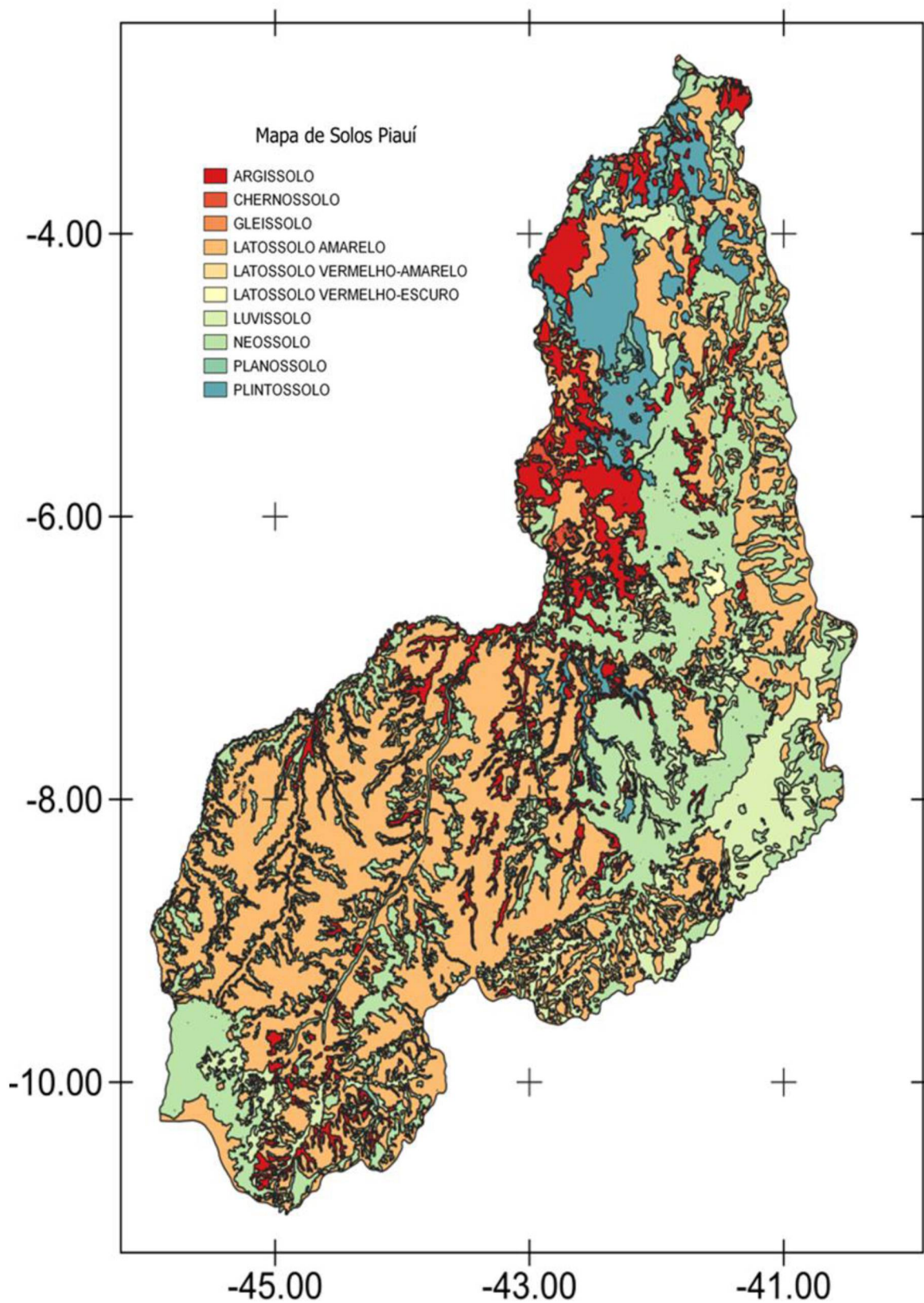
O cálculo do *BHA* foi realizado para a cultura da soja com o modelo AquaCrop, versão 6.0, disponibilizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (RAES et al., 2016). Não foram considerados estresses decorrentes de salinidade e fertilidade. O *BHA* foi realizado com periodicidade diária, resultando em séries de 36 anos de dados de saída. Os dados de entrada são divididos em categorias: climáticos (dispostos no item anterior); solo e cultura. Os valores de evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) foram calculados por Xavier et al. (2016), conforme a *Food and Agriculture Organization* (FAO), usando o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). A metodologia completa utilizada para o cálculo do *BHA* no AquaCrop encontra-se no APÊNDICE 3, que foi constituído por Gurski (2018), baseando-se em grande número de referências, principalmente: Raes (1982); Raes et al. (1988); Raes et al. (2006); e, Raes et al. (2016).

Os parâmetros de solos (APÊNDICE 4, TABELA A.4.1) foram considerados conforme a classificação de solos e texturas predominantes no Estado do Piauí (FIGURA 3.3).

A base principal de dados de solos utilizada foi o Mapa Exploratório de Reconhecimento de Solos do Estado do Piauí, elaborado pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (SNLCS) da Embrapa (1984), na escala 1:100000. A atualização da nomenclatura dos solos baseou-se no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2018), representando a área de estudo e distribuição das classes de solos predominantes no Estado do Piauí (FIGURA 3.3). Para fins de confiabilidade com a nova classificação dos solos, foi realizado um comparativo com a classificação de solos do estudo de Almeida (2015) para solos do Estado do Piauí.

Quanto aos parâmetros da cultura da soja para entrada no AquaCrop (APÊNDICE 4, TABELA A.4.2), seguiu-se as procedimentos e recomendações de Gurski (2018). Assim, foram considerados quatro períodos de desenvolvimento, sendo que o período II (crescimento vegetativo a florescimento) foi estendido ao longo de todo o ano. Os períodos I, III e IV as culturas tiveram apenas 1 dia. Logo, o período II que tem maior demanda hídrica perdurou ao longo de todo o ano, nos 36 anos de *BHA* simulados.

FIGURA 3.3 – MAPA DE SOLOS DO ESTADO DO PIAUÍ



FONTE: Adaptado da EMBRAPA (1984)

As componentes de saída diárias do *BHA* (série de 36 anos) no AquaCrop são: evapotranspiração da cultura (*ETc*), armazenamento de água no solo na zona da raiz (*S*), evapotranspiração real (*ETr*), deficiência hídrica (*Def*), excedente hídrico (*Exc*), escoamento superficial (*ES*), infiltração de água no solo (*Inf*), drenagem profunda (*DP*) e ascensão capilar (*AC*). No entanto, utilizou-se no presente estudo apenas a *ETr*, *Def* e *S*, pois são as componentes que mais contribuem para o *BHA*.

#### 3.4.4 Valor provável das componentes do *BHA* para o Estado do Piauí

Os procedimentos necessários para o cálculo dos valores decendiais prováveis das componentes de saída do *BHA* (*ETr*, *Def* e *S*) foram organizados e realizados em planilha eletrônica, contendo rotinas desenvolvidas especialmente para essa finalidade (SOUZA et al., 2013; SOUZA et al., 2014), seguindo as recomendações de Souza (2018):

- i) Agrupamentos dos dados diários das componentes de saída do *BHA* (*ETr*, *Def* e *S*), em decêndios (período de dez dias). Os valores diários *ETr*, *Def* e *S* foram organizados em 37 decêndios por ano. O trigésimo sétimo decêndio de cada ano foi composto pelos cinco ou seis (ano bissexto) últimos dias do ano. Os dados diários de *ETr*, *Def* e *S* foram tabulados e agrupados, separando os decêndios com valor igual à zero dos diferentes de zero. Para evitar inconsistências na estimativa dos parâmetros das *fdp*'s utilizadas, os decêndios com valor inferior a  $1 \text{ mm decêndio}^{-1}$  foram considerados iguais a zero;
- ii) Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados observados das séries decendiais de *ETr*, *Def* e *S*;
- iii) Determinação dos parâmetros estatísticos de cinco funções densidade de probabilidade (*fdp*'s) testadas (Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme) com as séries de valores decendiais (APÊNDICE 1). Os parâmetros estatísticos determinados foram: alfa e beta, para a *fdp* Gama; média e desvio padrão, para a Normal; maior valor, menor valor e moda, para a Triangular; média, para a Exponencial; e maior e menor valor, para a Uniforme (ASSIS et al., 1996; BUSSAB; MORETTIN, 2010);
- iv) Realização dos testes de aderência seguindo a metodologia de Kolmogorov-Smirnov (ASSIS et al., 1996; SOUZA, 2018), a 5% de probabilidade. O teste avalia,

por meio do valor  $D_{max}$ , o ajuste entre a *fdp* acumulada teórica  $F'(x)$  e a distribuição de frequência,  $F(x)$ , proveniente dos dados amostrados.

$$D_{max} = \text{Max } |F(x) - F'(x)|$$

Sendo:  $D_{max}$  – valor crítico para a estatística de Kolmogorov-Smirnov;  $F(x)$  – função de distribuição de probabilidade teórica;  $F'(x)$  – função de distribuição de probabilidade observada.

Para a condição “ $D_{max}$  calculado <  $D_{max}$  tabelado” aceita-se a hipótese de que os valores da amostra ajustaram-se bem à distribuição de probabilidade a 5% de significância, caso contrário, a hipótese é rejeitada.

v) Escolha da *fdp* de melhor ajuste às distribuições de frequência observadas, para estimativa da  $ETr$ ,  $Def$  e  $S$  prováveis (com a *fdp* de melhor ajuste), para os 37 decêndios dos anos analisados. Como algumas das *fdp*'s analisadas não admitem valores nulos adotou-se o conceito de distribuição mista (ASSIS et al., 1996):

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

Sendo:  $F(p)$  – função cumulativa de probabilidade da distribuição mista (%);  $P_o$  – probabilidade de ocorrência de decêndios com valor igual a zero (%) ou com valores menores que 1 mm decêndio<sup>-1</sup>;  $D(p)$  – probabilidade estimada com a função distribuição cumulativa teórica de melhor ajuste, cujos parâmetros foram determinados na ausência de decêndios com valor igual a zero (%).

vi) Determinação dos valores prováveis decendiais de  $S$  a 75% de probabilidade, bem como,  $ETr$  e  $Def$  a 25% de probabilidade, para cada localidade do *grid* regular (FIGURA 3.2).

$$S_{75\%} = P(S_{75\%} \in S \mid S_i \geq S_{75\%}) = 75\%$$

$$ETr_{25\%} = P(ETr_{25\%} \in ETr \mid ETr_i \geq ETr_{25\%}) = 25\%$$

$$Def_{25\%} = P(Def_{25\%} \in Def \mid Def_i \geq Def_{25\%}) = 25\%$$

Logo, para cada decêndio, o  $S_{75\%}$  refere-se ao valor de  $S$  que tenha 75% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade do armazenamento  $S_i$  ocorrer três vezes a cada quatro anos ou com tempo de retorno  $T = 1,33$  anos, em média. Para cada decêndio, a  $Def_{25\%}$  e  $ETr_{25\%}$  referem-se aos



valores de  $Def_i$  e  $ETr_i$  que tenham 25% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da deficiência  $Def_i$  e  $ETr_i$  ocorrerem uma vez a cada quatro anos ou com tempo de retorno  $T = 4$  anos, em média.

#### 3.4.5 Espacialização dos valores prováveis para o Estado do Piauí

Com os valores decediais prováveis calculados foram gerados mapas de  $ETr$ ,  $Def$  e  $S$  prováveis para todo o Estado do Piauí, com a média dos valores nas estações verão, outono, inverno e primavera. Os mapas foram gerados realizando-se a interpolação dos dados prováveis  $ETr$ ,  $Def$  e  $S$  com o programa *Surfer* 8.0. O método empregado para a interpolação dos dados foi a *krigagem* ordinária.

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As *fdp*'s triangular, exponencial e uniforme apresentaram baixa frequência no ajuste das componentes  $Def$ ,  $ETr$  e  $S$  (TABELA 3.1). Mesmo com baixa frequência, acredita-se que as três *fdp*'s são fundamentais nos ajustes envolvendo estudos com componentes do balanço hídrico agrícola, principalmente para os períodos em que existem poucos dados (períodos secos, falhas de dados, entre outros). Assim como observado no trabalho realizado por Gurski et al. (2018), as *fdp*'s Normal e Gama obtiveram bom ajustamento para os dados de saída do *BHA*, indicando que são *fdp*'s que podem ser utilizadas em diferentes regiões, sem que haja restrição da localização geográfica.

A *fdp* Normal apresentou bom ajuste (39% e 46%) às componentes  $ETr$  e  $S$ , respectivamente. Castro et al. (2002) comenta que variáveis sem limite inferior e superior são bem representadas pela *fdp* Normal. Os resultados foram bons com a *fdp* Normal, mesmo  $ETr$  e  $S$  apresentando limite inferior. Resultados parecidos foram obtidos por Gurski et al. (2018), realizando os mesmos ajustes do presente trabalho, para cultura da soja, em *grid* no Estado do Paraná.

TABELA 3.1 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (E – EXPONENCIAL; G – GAMA; N – NORMAL; T – TRIANGULAR; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL ( $E_{Tr}$ ), DEFICIÊNCIA HÍDRICA ( $Def$ ) E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO (S), PARA A CULTURA DA SOJA NO ESTADO DO PIAUÍ.

Decêndios	-- Melhor ajuste para $Def$ --					-- Melhor ajuste para $E_{Tr}$ --					-- Melhor ajuste para S --				
	N	T	G	E	U	N	T	G	E	U	N	T	G	E	U
1 (01/01 a 10/01)	22	13	180	113	2	266	37	2	0	25	120	27	169	0	14
2 (11/01 a 20/01)	7	21	183	119	0	269	46	0	0	15	160	31	136	0	3
3 (21/01 a 30/01)	77	31	114	99	9	242	70	3	0	15	129	26	173	0	2
4 (31/01 a 09/02)	70	9	103	148	0	218	77	20	0	15	141	34	128	0	27
5 (10/02 a 19/02)	1	2	224	103	0	264	45	17	0	4	168	32	110	0	20
6 (20/02 a 01/03)	1	2	219	108	0	276	51	2	0	1	179	41	70	0	40
7 (02/03 a 11/03)	0	0	174	156	0	260	38	22	0	10	145	31	103	0	51
8 (12/03 a 21/03)	35	13	216	66	0	252	27	43	0	8	209	59	54	0	8
9 (22/03 a 31/03)	41	10	226	52	1	224	42	57	0	7	184	35	89	0	22
10 (01/04 a 10/04)	47	8	189	83	3	228	36	52	7	7	157	29	74	0	70
11 (11/04 a 20/04)	61	10	136	119	4	217	40	31	23	19	120	50	136	1	23
12 (21/04 a 30/04)	71	21	91	138	9	202	56	3	25	44	110	46	162	1	11
13 (01/05 a 10/05)	165	14	66	45	40	137	27	85	18	63	114	36	169	1	10
14 (11/05 a 20/05)	181	30	54	24	41	74	4	199	25	28	93	19	203	0	15
15 (21/05 a 30/05)	223	31	37	18	21	53	5	132	113	27	80	12	234	0	4
16 (31/05 a 09/06)	275	18	15	8	14	30	3	163	118	16	129	13	185	0	3
17 (10/06 a 19/06)	266	25	9	8	22	12	2	178	126	12	169	20	139	0	2
18 (20/06 a 29/06)	216	30	68	2	14	6	1	129	185	9	198	12	114	0	6
19 (30/06 a 09/07)	187	24	104	0	15	6	0	199	122	3	216	21	90	0	3
20 (10/07 a 19/07)	125	24	176	0	5	26	0	221	82	1	210	27	92	1	0
21 (20/07 a 29/07)	89	36	189	0	16	6	4	250	70	0	230	25	70	0	5
22 (30/07 a 08/08)	109	32	182	0	7	4	0	239	87	0	202	38	87	0	3
23 (09/08 a 18/08)	83	28	212	0	7	4	0	246	79	1	208	41	76	1	4
24 (19/08 a 28/08)	78	31	211	0	10	0	0	287	43	0	216	36	72	1	5
25 (29/08 a 07/09)	137	18	175	0	0	0	0	287	43	0	211	29	87	0	3
26 (08/09 a 17/09)	129	26	159	0	16	2	0	284	44	0	216	25	86	0	3
27 (18/09 a 27/09)	160	24	135	0	11	3	2	258	67	0	220	15	93	0	2
28 (28/09 a 07/10)	276	12	39	0	3	1	1	193	135	0	193	22	112	0	3
29 (08/10 a 17/10)	252	30	5	0	43	26	4	191	94	15	149	19	154	1	7
30 (18/10 a 27/10)	199	27	52	11	41	66	4	162	65	33	108	10	208	0	4
31 (28/10 a 06/11)	154	35	95	45	1	131	23	98	69	9	110	29	188	0	3
32 (07/11 a 16/11)	115	17	149	39	10	140	15	124	47	4	110	32	186	0	2
33 (17/11 a 26/11)	137	21	118	54	0	167	29	98	28	8	107	41	177	0	5
34 (27/11 a 06/12)	138	21	95	60	16	155	18	120	19	18	133	27	163	0	7
35 (07/12 a 16/12)	105	17	147	59	2	190	35	68	19	18	103	27	189	0	11
36 (17/12 a 26/12)	103	17	127	73	10	267	32	22	0	9	56	20	234	0	20
37 (27/12 a 31/12)	22	6	208	94	0	290	23	17	0	0	1	0	251	78	0
Soma	4357	734	4882	1844	393	4714	797	4502	1753	444	5604	1037	5063	85	421
Porcentual (%)	36	6	40	15	3,2	39	7	37	14	4	46	8	41	1	3

FONTE: O autor (2018)

A *fdp* Gama também se ajustou bem aos dados de *ETr* (37%) e *S* (41%). A *fdp* Gama possui grande diversidade de forma, podendo algumas vezes se aproximar da forma da *fdp* Normal (ARAÚJO et al., 2010).

A *fdp* Gama apresentou melhor ajuste da *Def* (40%). O ajuste das *fdp*'s dos dados de *Def* se assemelha à distribuição dos dados de *P* obtidos no CAPÍTULO I do presente estudo. No entanto, há maior frequência para os valores próximos à zero, o que torna a distribuição dos dados de *Def* semelhante à forma da *fdp*'s lognormal ou exponencial. Silva et al. (2008) verificaram que predominam as funções lognormal, exponencial e gama para a deficiência hídrica decendial, com melhor ajuste quando são utilizadas as transformações nos dados pela raiz cúbica e raiz quadrada.

Os parâmetros das *fdp*'s de melhor ajuste para as componentes hídricas *ETr*, *Def* e *S* obtidos para o *Grid* regular de 0,25° x 0,25°, contendo os 330 pontos no Estado do Piauí, foram dispostos em uma planilha eletrônica (APÊNDICE 3) para calcular os valores de *ETr*, *Def* e *S* para qualquer nível de probabilidade entre 1 e 99%. Os valores médios e prováveis decendiais das componentes de saída do *BHA* (*ETr*, *Def* e *S*) para o Estado do Piauí estão apresentadas na TABELA 3.2. Nas FIGURAS 3.4, 3.5 e 3.6 encontram-se os mapas especializados, contendo os valores médios prováveis à 25%, 25% e 75%, das componentes *Def*<sub>25%</sub>, *ETr*<sub>25%</sub> e *S*<sub>75%</sub>, respectivamente, para as estações do verão, outono, inverno e primavera.

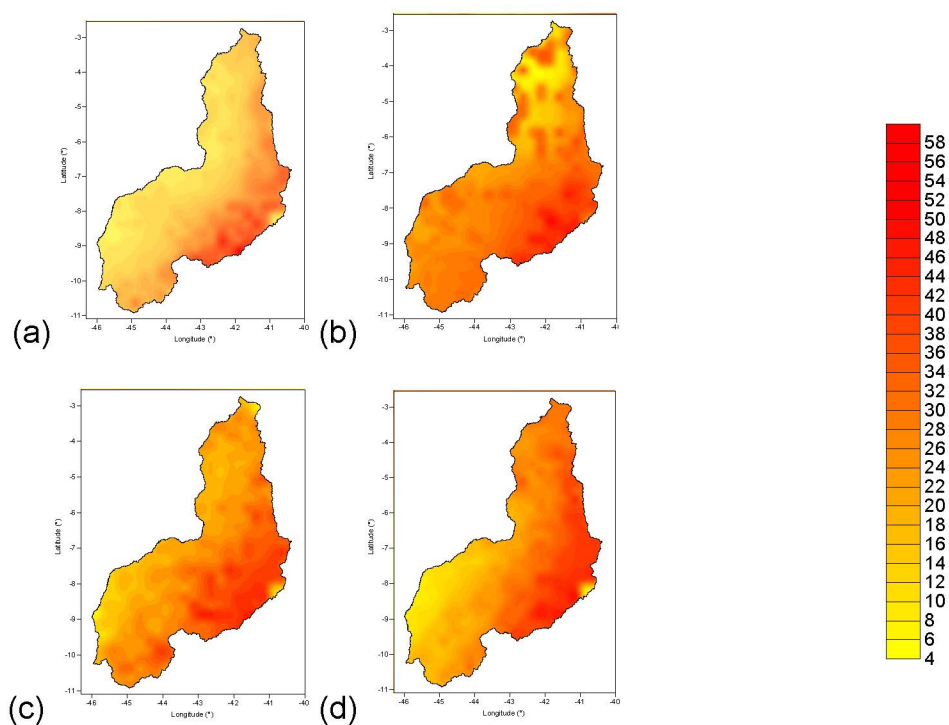
O clima e o solo são fatores que contribuem para as formas com que a *Def* pode ocorrer. O Estado do Piauí caracteriza-se por temperaturas médias entre 28 °C e 30 °C, e regime hídrico restritivo em algumas regiões, como visto no CAPÍTULO I do presente estudo. Tais características atribuem alto potencial para a implantação e condução de atividades agrícolas, o que provavelmente reduz o efeito dos sistemas de manejo sobre a produtividade das culturas. Contudo, é importante observar que o registro de deficiência hídrica não implica necessariamente em penalização da produtividade.

TABELA 3.2 – VALORES PROVÁVEIS E MÉDIOS DECENDIAIS DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA (*Def*), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (*ETr*) E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO (*S*), PARA A CULTURA DA SOJA, EM DIFERENTES NÍVEIS DE PROBABILIDADE NO ESTADO DO PIAUÍ.

Cultura Decêndios	----- Componentes hídricas para a cultura da soja -----					
	<i>Def</i> <sub>média</sub>	<i>Def</i> <sub>25%</sub>	<i>ETr</i> <sub>média</sub>	<i>ETr</i> <sub>25%</sub>	<i>S</i> <sub>média</sub>	<i>S</i> <sub>75%</sub>
	----- (mm decêndio <sup>-1</sup> ) -----					
1 (01/01 a 10/01)	16,10	24,61	32,94	38,32	52,4	43,6
2 (11/01 a 20/01)	15,57	24,68	32,45	39,22	69,4	55,4
3 (21/01 a 30/01)	17,68	28,99	31,47	38,36	83,0	68,9
4 (31/01 a 09/02)	15,17	22,77	32,28	37,30	97,7	81,8
5 (10/02 a 19/02)	11,53	16,48	35,11	39,76	115,7	99,1
6 (20/02 a 01/03)	13,93	19,82	34,40	39,81	127,0	112,0
7 (02/03 a 11/03)	12,68	17,56	34,58	39,29	131,5	113,0
8 (12/03 a 21/03)	7,96	11,06	36,35	40,20	136,4	119,1
9 (22/03 a 31/03)	9,70	13,20	35,50	38,39	135,3	116,7
10 (01/04 a 10/04)	10,75	14,49	34,43	38,19	131,4	114,2
11 (11/04 a 20/04)	13,48	18,77	32,68	38,34	126,9	107,9
12 (21/04 a 30/04)	16,33	23,78	29,14	35,59	123,3	105,5
13 (01/05 a 10/05)	20,54	29,92	26,51	33,22	117,2	99,2
14 (11/05 a 20/05)	24,37	35,72	21,90	28,25	110,3	93,6
15 (21/05 a 30/05)	28,35	38,48	18,13	24,07	106,0	89,1
16 (31/05 a 09/06)	32,19	40,59	13,44	18,02	101,4	87,2
17 (10/06 a 19/06)	34,14	41,82	9,63	13,02	98,3	82,3
18 (20/06 a 29/06)	34,61	41,86	6,62	9,19	95,6	82,5
19 (30/06 a 09/07)	34,21	41,18	5,15	7,03	93,8	79,4
20 (10/07 a 19/07)	34,31	40,87	3,84	5,13	92,0	80,3
21 (20/07 a 29/07)	35,02	42,94	2,99	3,99	90,4	78,0
22 (30/07 a 08/08)	35,90	43,69	2,37	3,11	88,9	76,5
23 (09/08 a 18/08)	37,03	44,18	2,13	2,79	87,6	75,0
24 (19/08 a 28/08)	37,83	45,56	2,06	2,72	86,4	73,8
25 (29/08 a 07/09)	38,95	46,11	2,22	2,99	85,4	72,2
26 (08/09 a 17/09)	38,79	47,36	2,67	3,64	84,7	71,9
27 (18/09 a 27/09)	37,07	45,49	4,11	5,76	84,5	72,4
28 (28/09 a 07/10)	35,58	44,80	5,56	7,68	85,1	72,2
29 (08/10 a 17/10)	32,46	45,50	7,76	10,98	87,3	73,6
30 (18/10 a 27/10)	28,67	40,82	9,92	13,68	89,6	74,9
31 (28/10 a 06/11)	25,85	36,42	11,91	16,14	92,9	78,6
32 (07/11 a 16/11)	22,92	31,89	13,67	17,28	96,7	82,2
33 (17/11 a 26/11)	19,16	28,02	15,95	20,91	102,1	86,8
34 (27/11 a 06/12)	16,58	25,24	17,12	20,77	107,3	91,3
35 (07/12 a 16/12)	15,83	23,96	17,53	21,90	111,1	93,4
36 (17/12 a 26/12)	13,41	21,22	20,06	24,29	106,8	84,7
37 (27/12 a 31/12)	7,13	10,16	17,54	21,01	31,7	20,2
Média	23,83	31,62	17,89	21,63	99,0	84,0

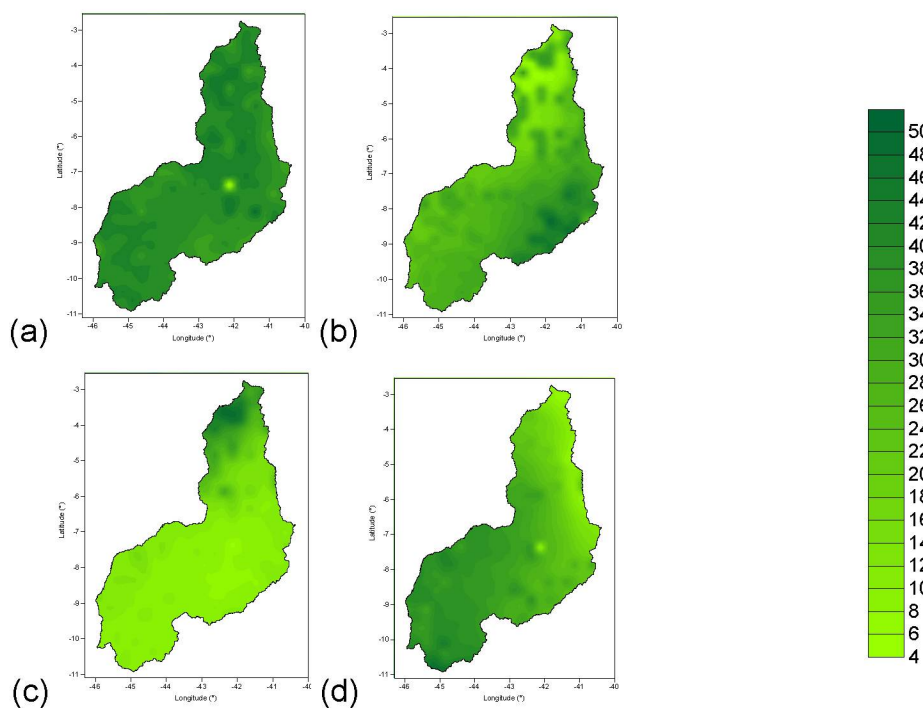
FONTE: O autor (2018)

FIGURA 3.4 – DEFICIÊNCIA HÍDRICA DECENAL MÉDIA PROVÁVEL A 25% ( $Def_{25\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>) NO ESTADO DO PIAUÍ, NAS ESTAÇÕES: a) VERÃO; b) OUTONO; c) INVERNO; E, d) PRIMAVERA.



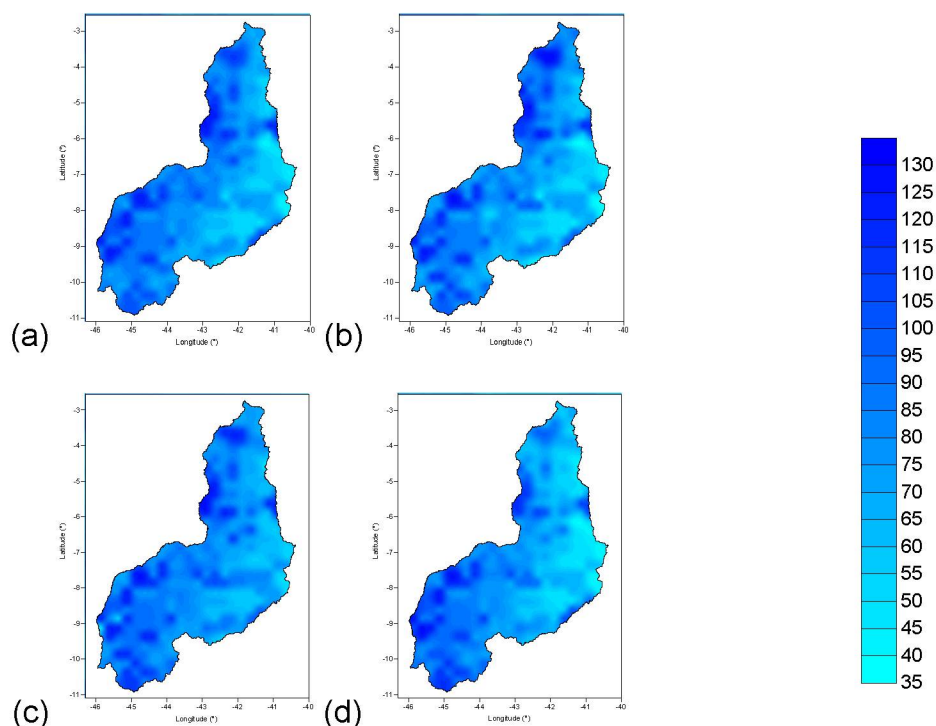
FONTE: O autor (2018)

FIGURA 3.5 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DECENAL MÉDIA PROVÁVEL A 25% ( $ETr_{25\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>) NO ESTADO DO PIAUÍ, NAS ESTAÇÕES: a) VERÃO; b) OUTONO; c) INVERNO; E, d) PRIMAVERA.



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 3.6 – ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO DECENDIAL MÉDIA PROVÁVEL A 75% ( $S_{75\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>) NO ESTADO DO PIAUÍ, NAS ESTAÇÕES: a) VERÃO; b) OUTONO; c) INVERNO; E, d) PRIMAVERA.



FONTE: O autor (2018)

A  $ETr_{25\%}$  apresentou média de 21,6 mm decêndio<sup>-1</sup> (TABELA 3.2 e FIGURA 3.5), sendo que em alguns períodos houve maior nível de estresse, visto que a  $Def_{25\%}$  média foi de 31,63 mm decêndio<sup>-1</sup>. A maior  $Def$  (14<sup>o</sup> a 32<sup>o</sup> decêndios) coincidiu com o período seco, quando as reservas de água do solo são baixas e as temperaturas são elevadas (FIGURA 3.4). No período posterior (decêndios 33<sup>o</sup> a 13<sup>o</sup>), tem-se aproximadamente ao início da estação chuvosa. Como exemplo, o impacto das chuvas na produção de soja na safra 2015/2016 gerou efeito no déficit hídrico final, e redução de 64,8% na produção de soja no Piauí (CONAB, 2016). O  $Def$  foi resultado da baixa disponibilidade de água e alta demanda evaporativa em determinados períodos. Em estudo realizado no Espírito Santo, Cecílio et al. (2012) destaca a maior possibilidade de ocorrer maiores valores de  $ETr$  nas proximidades do litoral, indicando influência da longitude, oceano e, principalmente, do relevo. Com os resultados das componentes hídricas do BHA ( $ETr$  e  $Def$ ) é possível verificar a influência para o uso de sistemas de irrigação para a produção da cultura da soja, permitindo a avaliação de projeto de irrigação.

A *Def* concentrou-se nas quatro estações do ano (FIGURA 3.4), com valores mais elevados na região semiárida, sentido leste/sudeste do Estado. Os resultados da *ETo* (CAPITULO I) conferem com o mesmo comportamento ocorrido com a *Def*, ambas para 25% de probabilidade. Andrade Júnior et al. (2001) constataram que a região sudeste do estado do Piauí sempre apresentou alto risco climático para as culturas de soja e milho, justamente pelos baixos índices pluviométricos. Em estudo realizado com o balanço hídrico agrícola provável para o Estado do Paraná, Gurski et al. (2018) verificou  $Def_{25\%} = 17,00 \text{ mm decêncio}^{-1}$  para a cultura da soja. No presente estudo a  $Def_{25\%}$  foi de  $31,62 \text{ mm decêncio}^{-1}$ , sendo agravada principalmente pela falta de chuva.

Marengo et al. (2016) observaram no semiárido Nordestino, incluindo a região leste/sudeste do Estado do Piauí, que o período entre 2011 e 2014 apresentou elevada deficiência hídrica, em razão da falta de chuvas, temperaturas elevadas e secura do ar. Os autores consideram que entre 2013 e 2015 a maior concentração de déficit hídrico incluiu particularmente o leste do Piauí, em que a situação de seca ainda persiste.

Andrade Júnior et al. (2001) realizando o zoneamento de risco agroclimático no Estado do Piauí verificaram que a região do Cerrado possui maior área com a produção da cultura da soja no Estado. Os autores consideram que as áreas são aptas para a produção agrícola (com baixo risco climático), por apresentarem solos Argissolos Vermelho-Amarelo e Vermelho-Escuro (com mais de 35% de argila), e com capacidade de armazenamento de água de 50 mm. Silva et al. (2008) destacam que em solos com alta capacidade de água disponível (104, 120 e 215 mm) reduz a deficiência hídrica do solo, influenciando no rendimento do desenvolvimento para as culturas. Diferentes tipos de solos e condições climáticas podem limitar o armazenamento de água em algumas localidades, influenciando decisivamente no *Def* alcançado com os cultivos agrícolas.

A dinâmica do armazenamento de água no solo (*S*) pode ocorrer em diferentes condições (textura, estrutura, densidade, porosidade, dentre outros), clima e cultura cultivada. O  $S_{75\%}$  apresentou média de 84,0 mm (TABELA 3.2 e FIGURA 3.6) e teve melhor ajuste com a *fdp* Normal (46%). Em condições diferentes de solos e clima, Gurski et al. (2018) realizando o *BHA* provável, encontraram valores médios

de  $S_{75\%} = 235,18$  mm usando os mesmos parâmetros para a cultura da soja no Estado do Paraná.

Liu e Shao (2014) encontraram valores médios de  $S$  de 166,7 mm para soja na China, em solo com 1,0 m de profundidade. Paredes et al. (2015) relatam que a profundidade da raiz atingiu 1,0 m para a cultura da soja no norte da China e Odhiambo e Irmak (2012) usaram 1,2 m de profundidade efetiva máxima para a soja em região do Nebraska. Salton e Tomazi (2014) destacam a cultivares de soja com maior comprimento de raízes poderão explorar maior volume de solo, tendo à sua disposição mais nutriente e maior oferta de água, fator fundamental para enfrentar os períodos de veranicos. Palosuo et al. (2011) descrevem que a profundidade máxima da raiz nos modelos pode ser considerada como a profundidade máxima com presença de raiz ou a profundidade máxima com o sistema radicular efetivo. As duas possibilidades alteram a disponibilidade de água no solo para a cultura e, portanto, os rendimentos simulados, principalmente sob déficit hídrico, o que consequentemente ocorreu no presente estudo no qual o  $S$  foi bastante superior a  $Def$ .

A superestimação do valor médio decendial provável do  $S$  estimada (TABELA 3.2 e FIGURA 3.6) destaca um aspecto importante que precisa ser melhorado e verificado no uso do AquaCrop e demais modelos de cultivo. As variáveis relacionadas ao solo e raízes exigem calibração local devido à interação das características da cultura e solo. Adeboye et al. (2019) concluíram que o modelo superestimou o armazenamento de água no solo nos estágios inicial e tardio do desenvolvimento da cultura da soja. Zeleke et al. (2011) verificaram que o AquaCrop tendeu a superestimar o conteúdo de água do solo.

O estudo das componentes hídricas, com o estabelecimento dos parâmetros das  $fdp$ 's de melhor ajuste para as componentes hídricas  $ETr$ ,  $Def$  e  $S$  obtidos para o *Grid* regular de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  (330 pontos) no Estado do Piauí, bem como como a possibilidade de calcular os valores de  $ETr$ ,  $Def$  e  $S$  para qualquer nível de probabilidade (1 e 99%) contribui decisivamente com informações técnicas para tomada de decisão e redução das incertezas para o cultivo da soja.



### 3.6 CONCLUSÕES

As funções densidade de probabilidade (*fdp's*) Normal e Gama se ajustam melhor às componentes de saída do balanço hídrico (*Def*, *ETr* e *S*).

O Estado do Piauí tem valores prováveis médios de  $ETr_{25\%} = 21,63$  mm decêndio<sup>-1</sup>,  $Def_{25\%} = 31,62$  mm decêndio<sup>-1</sup> e  $S_{75\%} = 84,0$  mm, para a cultura da soja, no estágio II.

A matriz dos parâmetros das *fdp's* de melhores ajuste permitiu calcular rapidamente as componentes hídricas *Def*, *ETr* e *S* para o *Grid* regular de 0,25° x 0,25° (330 pontos) no Estado do Piauí, para qualquer nível de probabilidade, contribuindo para tomada de decisão e redução de incertezas do cultivo da soja.

### 3.7 REFERÊNCIAS

- ABRHA, B.; DELBECQUE, N.; RAES, D.; TSEGAY, A.; TODOROVIC, M.; HENG, L.; VANUYTRECHT, E.; GEERTS, S.; GARCIA-VILA, M.; DECKERS, S. Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) based on modelled yield response to water with AquaCrop. **Experimental Agriculture**, v. 48, p. 252–271. 2012.
- ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K. O.; PRASAD, K. C. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 1130–1146, may./jan. 2019.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.
- ALMEIDA, K. N. S. **Aptidão agrícola dos solos do Estado do Piauí**. Bom Jesus. 71p. DiSSERTAÇÃO (Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Piauí. 2015.
- ÁLVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.J.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, 2013; p. 11-728, 2013.
- ANDARZIAN, B.; BANNAYAN, M.; STEDUTO, P.; MAZRAEH, H.; BARATI, M. E.; BARATI, M. A.; RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, p. 1–8, aug./sep. 2011.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SENTELHAS, P. C.; SILVA, A. A. G. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p.63-68, jan. 2003.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SILVA, C. O. Zoneamento de risco climático para a cultura da soja no Estado do Piauí. Embrapa Meio-Norte, Teresina, 23 p. 2007.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SENTELHAS, P. C.; LIMA, M. G.; AGUIAR, M. J. N.; LEITE, D. A. S. R. Zoneamento agroclimático para as culturas de milho e de soja no estado do Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo v. 9, n. 3, p. 544-550, ago./dez. 2001.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SILVA F. A. M.; LIMA M. G.; AMARAL J. A. B. Zoneamento de aptidão climática para o algodoeiro herbáceo no Estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 175-184, abri./jun. 2009.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SILVA, C. O.; SOUSA, V. F.; RIBEIRO V. Q. Avaliação de métodos para estimativa de evapotranspiração de referência no Estado do Piauí. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n.1, p. 181-190, ago. 2017.

ANJOS, F. A. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop**. Rio Largo, 2011. 72p. Dissertação (Mestrado em Agronomia; Produção vegetal; Proteção de plantas) - Universidade Federal de Alagoas.

ARAÚJO, E. M.; SILVA, I. N.; OLIVEIRA, J. B.; CAVALCANTE JÚNIOR, E. G.; ALMEIDA, B. M. Aplicação de seis distribuições de probabilidade a séries de temperatura máxima em Iguatu – CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 1, p. 36-45, jan./mar. 2010.

ASSIS, F. N.; ARRUDA, H. V.; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas, 1996.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. São Paulo: Saraiva, 2010.

CASTRO, M. C.; FARIA, M. A.; SILVA, A. M. Sistema computacional para a determinação da lâmina ótima econômica em irrigação pressurizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 372-378, jul. 2002.

CECÍLIO, R. A.; SILVA, K. R.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M. Método para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.4, p.478-488, abr. 2012.

CEPRO. Fundação Centro de Pesquisas Econômicas e Sociais do Piauí. Diagnóstico e diretrizes para o setor mineral do Estado do Piauí. 2004. Disponível em: <[http://www.cepro.pi.gov.br/download/200804/CEPRO16\\_6695f7c23c.pdf](http://www.cepro.pi.gov.br/download/200804/CEPRO16_6695f7c23c.pdf)>. Acesso em: 13 ago. 2017.

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SAAD, A. M. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n.1, p. 23-28, mai. 2000.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Oitavo levantamento. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos**, Brasília, v. 3, n. 8, p.1-134, maio 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 maio 2016.

EMBRAPA – **Mapa exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Piauí**. 1984. Escala 1:1.000.000.

EMBRAPA - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília, DF. 2018.

EVANGELISTA, B. A.; SILVA, F. A. M.; SIMON, J.; CAMPOS, L. J. M.; VALE, T. M. Zoneamento de risco climático para determinação de épocas de semeadura da cultura da soja na região do MATOPIBA. Embrapa Pesca e Aquicultura, Palmas, jul. 2017.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. **Agronomy Journal Abstract**, v. 101, p. 469–476. 2009.

GURSKI, B. C. **Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná**. 132 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; XAVIER, A. C.; GRABARSKI, F. A. P.; UMLAUF, C. R. **Balço hídrico agrícola provável para as culturas milho e soja no Estado do Paraná**. In: V Congresso Online - Agronomia, São Paulo, 2018.

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STETUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal Abstract**, v. 101, p. 448–459. 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 2010.

JIN, X. L.; FENG, H. K.; ZHU, X. K.; LI, Z. H.; SONG, S. N.; SONG, X. Y.; YANG, G. J.; XU, X. G.; GUO, W. S. Assessment of the AquaCrop model for use in simulation of irrigated winter wheat canopy cover, biomass, and grain yield in the North China Plain. **PLoS One**, v. 9, dec./jan. 2014.

KATERJI, N.; CAMPI, P.; MASTRORILLI, M. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 14–26, dec. 2013.

LIU, B.; SHAO, M. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 974-984, mar./jun. 2014.

MARENGO, J. A.; CUNHA A. P.; ALVES L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 4, p. 49-54. 2016.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; GIAROLLA, A.; GAROFOLO, L. L.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; PAOLICCHI, L. T. L.

C.; PINTO, G. L. N. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, v. 160, p. 21-30, fev. 2018.

ODHIAMBO, L. O.; IRMAK, S. Evaluation of the impact of surface residue cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 104, p. 221–234, apr./dec. 2012.

OLIVEIRA, L. F. C.; CARVALHO, D. F. Regionalização da lâmina suplementar de irrigação e época de plantio da cultura de feijão, no Estado do Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, p. 106-110, jun/abr. 2003.

PALOSUO, T.; KERSEBAUM, K. C.; ANGULO, C.; HLAVINKA, P.; MORIONDO, M.; OLESEN, J. E.; PATIL, R. H.; RUGET, F.; RUMBAUR, C.; TAKÁČ, J.; TRNKA, M.; BINDI, M.; CALDAG, C.; EWERT, F.; FERRISE, R.; MIRSCHEL, W.; SAYLAN, L.; SISKÁ, B.; RÖTTER, R. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop growth models. **European Journal of Agronomy**, v. 35, p.103–114, nov./may. 2011.

PAREDES, P.; MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural Water Management**, Lisbon, v. 144, p. 81–97, mar./jun. 2014.

PAREDES, P.; WEI, Z.; LIU, Y.; XU, D.; XIN, Y.; ZHANG, B.; PEREIRA, L. S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. **Agricultural Water Management**, Lisbon, v. 152, p. 57–71, jul./jan. 2015.

RAES D.; STEDUTO P.; HSIAO T. C.; FERERES E. AquaCrop version 5.0 reference manual. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.

RAES, D. **A summary simulation model of the water budget of a cropped soil**. 110 f. Dissertation, Leuven: K.U. Leuven University. 1982.

RAES, D.; GEERTS, S.; KIPKORIR, E.; WELLENS, J.; SAHLI, A. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. **Agricultural Water Management**, v. 81, p. 335-357. 2006.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: ii. main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 438–447. 2009.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo**. Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS. 2014. Comunicado Técnico.

SAMPAIO, S. C.; LONGO, A. J.; QUEIROZ, M. M. F.; GOMES, B. M.; VILLAS BOAS, M. A.; SUSZEK, M. Estimativa e distribuição da precipitação mensal provável no Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Human and Social Sciences**, Maringá, v. 28, p. 267-272. 2006.

SHRESTHA, N.; RAES, D.; VANUYTRECHT, E.; SAH, S. K. Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling. **Agricultural Water Management**, v. 122, p. 53–62, mar./apr. 2013.

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**, v. 38, n. 7, p. 1893-1899, dez./mar. 2008.

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F.; BRAGA, C. C.; SILVA JÚNIOR, J. L. C.; SOUZA, E. P.; ALMEIDA, R. S. R.; SILVA, M. T.; HOLANDA, R. M. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48, dez./out. 2018.

SOCCOL, 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**, v. 14, p. 569–574, nov./dez. 2010.

SOUZA, J. L. M. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados**: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR; 2018.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; DAMAZIO, E. C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 7, p. 693-702, jul. 2013.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; GOMES, S. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 2, p. 279-291, abr./jun. 2014.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal Abstract**, v. 101, p. 426-437, apr./may. 2009.

TSEGAY, A.; RAES, D.; GEERTS, S.; VANUYTRECHT, E.; ABRHA, B.; DECKERS, J.; BAUER, H.; GEBREHIWOT, K. Unravelling crop water productivity of Tef (*Eragrostis Tef* (Zucc.) Trotter) through AquaCrop in Northern Ethiopia. **Experimental Agriculture**, v. 48, p. 222–237. 2012.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659. 2016.

ZELEKE, K. T.; LUCKETT, D.; COWLEY, R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 1610–1618. 2011.

ZINYENGERE, N.; MHIZHA, T.; MASHONJOWA, E.; CHIPINDU, B.; GEERTS, S.; RAES, D. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, p. 1792–1799, sep./jul. 2011.

#### 4 CONCLUSÃO GERAL

As funções de densidade de probabilidade (*fdp's*) Gama e Exponencial apresentaram melhor ajuste as séries dos valores decendiais de *P*, e as *fdp's* Normal e Gama ajustaram-se melhor as séries dos valores decendiais de *ETo*, *Def*, *ETr* e *S*.

A *P* média total provável foi menor que a *ETo* total média provável em todo o todo o Estado do Piauí. A *P* provável foi maior durante estações verão e outono e os maiores valores de *ETo*<sub>25%</sub> ocorrem na região leste/sudeste, independente da estação do ano.

O Estado do Piauí tem valores prováveis médios de *ETr*<sub>25%</sub> = 21,6 mm decêndio<sup>-1</sup>, *Def*<sub>25%</sub> = 31,63 mm decêndio<sup>-1</sup> e *S*<sub>75%</sub> = 84,0 mm, para a cultura da soja, no estágio II. A matriz dos parâmetros das *fdp's* de melhores ajuste permitiu calcular rapidamente as componentes hídricas *Def*, *ETr* e *S* para o *Grid* regular de 0,25° x 0,25° (330 pontos) no Estado do Piauí, para qualquer nível de probabilidade, contribuindo para tomada de decisão e redução de incertezas do cultivo da soja.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversas componentes hídricas e variáveis climáticas foram estudadas no presente trabalho: precipitação ( $P$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), evapotranspiração real ( $ET_r$ ), armazenamento de água no solo na zona da raiz ( $S$ ) e deficiência hídrica ( $Def$ ).

Os valores prováveis das componentes do balanço hídrico podem ser consideradas como um instrumento dinâmico e assim sendo, deve passar por revisões e atualizações contínuas visando aperfeiçoamento para redução das incertezas de suas estimativas. A redução das incertezas pode tornar possível na medida em que aumenta o número de estações climatológicas e postos pluviométricos, bem como de suas séries históricas de medições diárias ou em um longo período de tempo.

Os resultados obtidos no presente estudo podem servir como instrumento de gestão de política pública quanto na tomada de decisão pelos diferentes agentes dos setores do agronegócio no Estado do Piauí.

O aperfeiçoamento das técnicas de análise para variáveis climatológicas por meio das ferramentas de geoprocessamento, estudos matemáticos e probabilísticos permitem a evolução de técnicas de manejo da cultura, propiciando maior retenção e melhor aproveitamento de condições hídricas do solo.

Modelos de simulação de culturas podem ajudar pesquisadores, agências governamentais e produtores a avaliar as melhores estratégias para manejar suas lavouras no campo, de acordo com as condições climáticas.

O presente estudo não teve a pretensão de restringir o cultivo da soja no Estado do Piauí, mas tão somente orientar a tomada de decisão de acordo com o comportamento das componentes hídricas estudadas durante uma série de anos analisados. Posteriormente, poderão ser realizados estudos da variabilidade tanto espacial quanto temporal da disponibilidade hídrica dos solos e sua interação com os fatores climáticos ambientais, tendo em vista o manejo sustentável do solo e da água. Contudo, é preciso considerar que a interação dos elementos climatológicos pode variar entre espécies e cultivares, dependendo de estágio de desenvolvimento, confirmando a necessidade de mais estudos sobre a interação água-solo-planta-atmosfera.

## 6 REFERÊNCIAS GERAIS

ABRHA, B.; DELBECQUE, N.; RAES, D.; TSEGAY, A.; TODOROVIC, M.; HENG, L.; VANUYTRECHT, E.; GEERTS, S.; GARCIA-VILA, M.; DECKERS, S. Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) based on modelled yield response to water with AquaCrop. **Experimental Agriculture**, v. 48, p. 252–271. 2012.

ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K. O.; PRASAD, K. C. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 1130–1146, may./jan. 2019.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.

ALMEIDA, K. N. S. **Aptidão agrícola dos solos do Estado do Piauí**. Bom Jesus. 71p. Diissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Piauí. 2015.

ÁLVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.J.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, 2013; p. 11-728, 2013.

ANDARZIAN, B.; BANNAYAN, M.; STEDUTO, P.; MAZRAEH, H.; BARATI, M. E.; BARATI, M. A.; RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, p. 1–8, aug./sep. 2011.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A. **Precipitação pluviométrica provável em municípios do cerrado piauiense**. Teresina, 22p, 1997.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SENTELHAS, P. C.; SILVA, A. A. G. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p.63-68, jan. 2003.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SILVA, C. O. Zoneamento de risco climático para a cultura da soja no Estado do Piauí. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2007. 23 p.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M.; CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q. Parametrização de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade da cultura do milho na região de Parnaíba, Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.37, p. 130-134, ago./dez. 2006.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SENTELHAS, P. C.; LIMA, M. G.; AGUIAR, M. J. N.; LEITE, D. A. S. R. Zoneamento agroclimático para as culturas de milho e de soja no estado do Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo v. 9, n. 3, p. 544-550, ago./dez. 2001.



ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SILVA F. A. M.; LIMA M. G.; AMARAL J. A. B. Zoneamento de aptidão climática para o algodoeiro herbáceo no Estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 175-184, abri./jun. 2009.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SILVA, C. O.; SOUSA V. F.; RIBEIRO V. Q. Avaliação de métodos para estimativa de evapotranspiração de referência no Estado do Piauí. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n.1, p. 181-190, ago. 2017.

ANJOS, F. A. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop**. Rio Largo, 2011. 72p. Dissertação (Mestrado em Agronomia; Produção vegetal; Proteção de plantas) - Universidade Federal de Alagoas.

ARAÚJO, E. M.; SILVA, I. N.; OLIVEIRA, J. B.; CAVALCANTE JÚNIOR, E. G.; ALMEIDA, B. M. Aplicação de seis distribuições de probabilidade a séries de temperatura máxima em Iguatu – CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 1, p. 36-45, jan./mar. 2010.

ARAYA A.; KEESSTRA S. D.; STROOSNIJDER L. A new agro-climatic classification for crop suitability zoning in northern semi-arid Ethiopia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Mekelle, v. 150, p. 1057–1064, oct./apr. 2010.

ASSIS, F. N.; ARRUDA, H. V.; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas, 1996.

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**, Campina Grande, v. 13, p. 906-915, abr. 2009.

BARRETO, H. B. F.; PEREIRA, G. M.; SANTOS W. O.; FREIRE, F. G. C.; MAIA P. M. E. Avaliação de funções de probabilidade e relação-intensidade-duração-frequência para precipitação extrema em Nepomuceno-MG. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 08, n. 02, p.118–127, mai./ago. 2015.

BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; ZIMMER, D.; SIERRA, J.; BERTUZZI, P.; BURGER, P.; BUSSIÈRE, F.; CABIDOCHÉ, Y. M.; CELLIER, P.; DEBAEKE, P.; GAUDILLÈRE, J. P.; HÉNAULT, C.; MARAUZ, F.; SEGUIN, B. Na overview of the crop model STICS. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 309-332. 2003.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. São Paulo: Saraiva, 2010.

CAMARGO, A. P.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251–257, jul. 1999.

CASTRO, M. C.; FARIA, M. A.; SILVA, A. M. Sistema computacional para a determinação da lâmina ótima econômica em irrigação pressurizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 372-378, jul. 2002.

CATALUNHA, M. J.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 153-162. 2002.

CECÍLIO, R. A.; SILVA, K. R.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M. Método para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.4, p.478-488, abr. 2012.

CEPRO. Fundação Centro de Pesquisas Econômicas e Sociais do Piauí. Diagnóstico e diretrizes para o setor mineral do Estado do Piauí. 2004. Disponível em: <[http://www.cepro.pi.gov.br/download/200804/CEPRO16\\_6695f7c23c.pdf](http://www.cepro.pi.gov.br/download/200804/CEPRO16_6695f7c23c.pdf)>. Acesso em: 13 ago. 2017.

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SAAD, A. M. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n.1, p. 23-28, mai. 2000.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Oitavo levantamento. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos**, Brasília, v. 3, n. 8, p.1-134, maio 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 maio 2016.

DENSKI, A. P. N.; BACK, A. J. Aderência de distribuições de probabilidade de evapotranspiração de referência decendial. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 17, jul./dez. 2015.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. Rome, 1977.

EMBRAPA – **Mapa exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Piauí**. 1984. Escala 1:1.000.000.

EMBRAPA - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília, DF. 2018.

EVANGELISTA, B. A.; SILVA, F. A. M.; SIMON, J.; CAMPOS, L. J. M.; VALE, T. M. Zoneamento de risco climático para determinação de épocas de semeadura da cultura da soja na região do MATOPIBA. Embrapa Pesca e Aquicultura, Palmas, jul. 2017.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. **Agronomy Journal Abstract**, v. 101, p. 469–476. 2009.

FRANCISCO, E. A. B.; CÂMARA, G. M. S. Desafios atuais para o aumento da produtividade da soja. Informações agrônômicas Nº 143 – Setembro, 2013.

GERVOIS, S.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; VIOVY, N.; CIAIS, P.; BRISSON, N.; SEGUIN, B.; PERRIER, A. Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites. **Earth Interact**, v. 8, p. 1–25. 2004.

GOMES, A. A. N.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; MEDEIROS, R. M. Evaporação de referência mensal para o Estado do Piauí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 560-564, mar. 2005

GREATREX, H. L.; GRIMES, D. I. F.; WHEELER, T. Application of seasonal rainfall forecasts and satellite rainfall observations to crop yield forecasting for Africa. v. 11, p. 5434. 2012.

GURSKI, B. C. **Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná**. 132 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; BARROCA, M. V.; XAVIER, A. C.; JERSZURKI, D. **Evapotranspiração de referência e precipitação pluviométrica prováveis no Estado do Paraná**. In: V Congresso Online - Agronomia, São Paulo, 2017.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; XAVIER, A. C.; GRABARSKI, F. A. P.; UMLAUF, C. R. **Balanço hídrico agrícola provável para as culturas milho e soja no Estado do Paraná**. In: V Congresso Online - Agronomia, São Paulo, 2018.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. O agronegócio da soja nos contextos mundial. Londrina, **Embrapa Soja**, p. 70. 2014.

HOPMANS, J. W.; BRISTOW, K. L. Current capabilities and future needs of root water and nutrient uptake modeling. **Advances in Agronomy**, v. 77, p. 103–183. 2002.

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STETUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal Abstract**, v. 101, p. 448–459. 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 2010.

JENSEN, M. E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York: ASCE, p. 215.1974.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, A. W. P. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba – PR. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 33, n. 2, p.118-129, jul./jan. 2015.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. C. R. Expanding the geography of evapotranspiration: An improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. **PLoS ONE**, v. 12, n. 6, p. 1-1. 2017.

JIN, X. L.; FENG, H. K.; ZHU, X. K.; LI, Z. H.; SONG, S. N.; SONG, X. Y.; YANG, G. J.; XU, X. G.; GUO, W. S. Assessment of the AquaCrop model for use in simulation of irrigated winter wheat canopy cover, biomass, and grain yield in the North China Plain. **PLoS One**, v. 9, dec./jan. 2014.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOW, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**. 2003.

JUNQUEIRA JÚNIOR, 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, v. 31, n. 3, p. 842-850, maio/jun. 2007.

KATERJI, N.; CAMPI, P.; MASTRORILLI, M. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 14–26, dec. 2013.

KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; HARGREAVES, J. N. G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J. P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, E.; BRISTOW, K. L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R. L.; FREEBAIRN, D. M.; SMITH, C. J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal Agronomy**, v. 18, p. 267-288. 2003.

LIU, B.; SHAO, M. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 974-984, mar./jun. 2014.

LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; HEINEMANN, A. B. Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 605-613, out./dez. 2010.

MARENGO, J. A.; CUNHA A. P.; ALVES L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 4, p. 49-54. 2016.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; GIAROLLA, A.; GAROFOLO, L. L.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; PAOLICCHI, L. T. L. C.; PINTO, G. L. N. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, v. 160, p. 21-30, nov./nov. 2018.

MORETO, V. B.; ROLIM, G. S. Estimation of annual yield and quality of “Valencia” orange related to monthly water deficiencies. **African Journal of Agricultural Research**, v.10, n. 1, p. 543-553, aug./dec. 2015.

MORETO, V. B.; ROLIM, G. S.; ZACARIN, B. G.; VANIN, A. P.; SOUZA, L. M.; LATADO, R. R. Agrometeorological models for forecasting the qualitative attributes of “Valência” oranges. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, p. 847-864, nov./aug. 2017.

NGETICH, K. F.; RAES, D.; SHISANYA, C. A.; MUGWE, J.; MUCHERU-MUNA, M.; MUGENDI, D. N.; DIELS, J. Calibration and validation of AquaCrop model for maize in sub-humid and semiarid regions of central highlands of Kenya. In: Third RUFORUM Biennial Meeting 24–28 September. Uganda, Entebbe. 2012.

ODHIAMBO, L. O.; IRMAK, S. Evaluation of the impact of surface residue cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 104, p. 221– 234, apr./dec. 2012.

OLIVEIRA C. T. **Modelo AquaCrop: calibração, validação e uso para soja e milho na região dos Campos Gerais**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

OLIVEIRA, L. F. C.; CARVALHO, D. F. Regionalização da lâmina suplementar de irrigação e época de plantio da cultura de feijão, no Estado do Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, p. 106-110, jun/abr. 2003.

PALOSUO, T.; KERSEBAUM, K. C.; ANGULO, C.; HLAVINKA, P.; MORIONDO, M.; OLESEN, J. E.; PATIL, R. H.; RUGET, F.; RUMBAUR, C.; TAKÁC, J.; TRNKA, M.; BINDI, M.; CALDAG, C.; EWERT, F.; FERRISE, R.; MIRSCHEL, W.; SAYLAN, L.; SISKÁ, B.; RÖTTER, R. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop growth models. **European Journal of Agronomy**, v. 35, p.103–114, nov./may. 2011.

PAREDES, P.; MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural Water Management**, Lisbon, v. 144, p. 81–97, mar./jun. 2014.

PAREDES, P.; WEI, Z.; LIU, Y.; XU, D.; XIN, Y.; ZHANG, B.; PEREIRA, L. S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. **Agricultural Water Management**, Lisbon, v. 152, p. 57–71, jul./jan. 2015.

PIEKARSKI, K. R. **Produtividades de soja e milho estimadas com o modelo aquacrop na região dos Campos Gerais**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

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

PRUITT, W. O.; OETTINGEN, S.; MORGAN, D. L. Central California evapotranspiration frequencies. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 98, n. 2, p. 177-184, 1972.

RAES D.; STEDUTO P.; HSIAO T. C.; FERERES E. AquaCrop version 5.0 reference manual. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.

RAES, D. **A summary simulation model of the water budget of a cropped soil**. 110 f. Dissertation, Leuven: K.U. Leuven University. 1982.

RAES, D.; GEERTS, S.; KIPKORIR, E.; WELLENS, J.; SAHLI, A. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. **Agricultural Water Management**, v. 81, p. 335-357. 2006.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: ii. main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 438-447. 2009.

RAY, D. K.; GERBER, J. S.; MACDONALD, G. K.; WEST, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6. 2015.

ROSA, S. L. K. **Análise de sensibilidade, calibração e validação da produtividade do trigo com o modelo AquaCrop na região dos Campos Gerais**. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

SAAD, J. C. C.; SCALOPPI, E. J. Frequência de distribuição de evapotranspiração para dimensionamento de sistemas de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: ABID, 1988. p. 1037-1052.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo**. Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS. 2014. Comunicado Técnico.

SAMPAIO, S. C.; LONGO, A. J.; QUEIROZ, M. M. F.; GOMES, B. M.; VILLAS BOAS, M. A.; SUSZEK, M. Estimativa e distribuição da precipitação mensal provável no Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Human and Social Sciences**, Maringá, v. 28, p. 267-272. 2006.

SHAMSNIA, S. A.; PRIMORADIAN, N. Simulation of rainfed wheat yield response to climatic fluctuations using model (case study: Shiraz Region in Southern of Iran). **International Journal of Engineering Science Invention**, v. 2, p. 51–56. 2013.

SHRESTHA, N.; RAES, D.; VANUYTRECHT, E.; SAH, S. K. Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling. **Agricultural Water Management**, v. 122, p. 53–62, mar./apr. 2013.

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**, v.38, n.7, p. 1893-1899, dez./mar, 2008.

SILVA, A. C.; LIMA, L. A.; EVANGELISTA, A. W. P.; MARTINS, C. P. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do cafeeiro irrigado por pivô central. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.12, p.1215–1221, mar./set. 2011.

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 precipitação em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 135-142, abr./jun. 2011.

SILVA, C. O.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUSA, V. F.; RIBEIRO, V. Q.; SENTELHA, P. C. Estimativa da evapotranspiração de referência com dados climáticos limitados no estado do Piauí. **Revista Espacios**, França, v. 37, n.23, p. 12, mar./abr. 2016.

SILVA, F. C.; FIETZ, C. R.; FOLEGATTI, 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**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 284-286, 1998.

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**, v. 38, n. 7, p. 1893-1899, dez./mar. 2008.

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F.; BRAGA, C. C.; SILVA JÚNIOR, J. L. C.; SOUZA, E. P.; ALMEIDA, R. S. R.; SILVA, M. T.; HOLANDA, R. M. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48, dez./out. 2018.

SOCCOL, 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**, v. 14, p. 569–574, nov./dez. 2010.

SOUZA, J. L. M. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados**: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2018.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; DAMAZIO, E. C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 48, n.7, p. 693-702, out./jun. 2013.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; GOMES, S. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 2, p. 279-291, abr./jun. 2014.

SOUZA, J. M. L. **Ciclo da água na agricultura: fundamentos para o estudo do sistema solo-planta-atmosfera**. Curitiba: Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2017.

SOUZA, J. M. L. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados**: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: Plataforma Moretti /DSEA/SCA/UFPR, 2018.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal Abstract**, v. 101, p. 426-437, apr./may. 2009.

STOCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 289-307. 2003.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, J. P.; PAULA, A.; GUIMARAES, D. U. G.; BARROSO N.I.S. Estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do Estado da Bahia. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, p.136–143, mar./jun. 2012.

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

TIXIER, P.; MALÉZIEUX, E.; DOREL, M.; BOCKSTALLER, C.; GIRARDIN, P. Rpest-an indicator linked to a crop model to assess the dynamics of the risk of pesticide water pollution. Application to banana based cropping systems. **European Journal of Agronomy**, v. 26, p. 71–81. 2007.

TSEGAY, A.; RAES, D.; GEERTS, S.; VANUYTRECHT, E.; ABRHA, B.; DECKERS, J.; BAUER, H.; GEBREHIWOT, K. Unravelling crop water productivity of Tef (*Eragrostis Tef* (Zucc.) Trotter) through AquaCrop in Northern Ethiopia. **Experimental Agriculture**, v. 48, p. 222–237. 2012.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; BARROS, A. H. C. Zoneamento de aptidão climática do Estado de Pernambuco para três distintos cenários pluviométricos. Recife: COTEC/DATA AGROS/SPRRA-PE, 2001. 38p. (Relatório Técnico).

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644–2659. 2016.

ZELEKE, K. T.; LUCKETT, D.; COWLEY, R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 1610–1618. 2011.

ZINYENGERE, N.; MHIZHA, T.; MASHONJOWA, E.; CHIPINDU, B.; GEERTS, S.; RAES, D. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, p. 1792–1799, sep./jul. 2011.



## APÊNDICE 1 – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP)

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 decendiais de diversas variáveis, bem como para determinar os valores prováveis de ocorrência das componentes hídricas com a *fdp* de melhor ajuste. O presente Apêndice foi apresentado por Jerszurki (2013), baseando-se nas recomendações de Souza (2018).

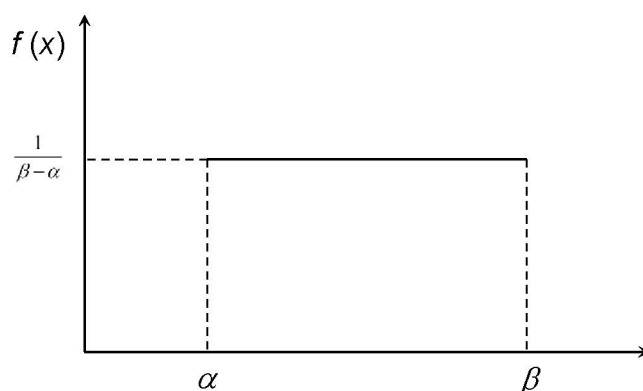
### 1 Função densidade de probabilidade Uniforme

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 A.1.1).

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

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 A.1.1 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE UNIFORME.



Fonte: Souza (2018)

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  $x$ .

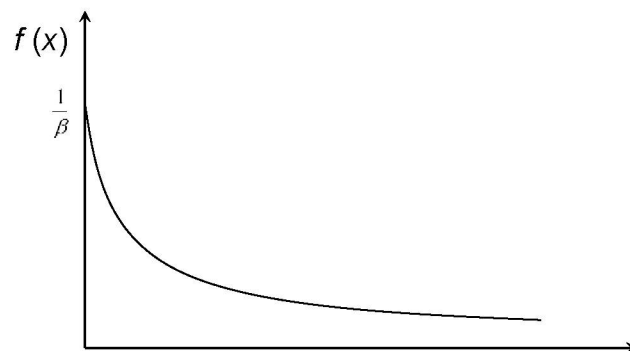
## 2 Função densidade de probabilidade Exponencial

A função densidade de probabilidade Exponencial (FIGURA A.1.2) 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 A.1.2 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE EXPONENCIAL.



Fonte: Souza (2018)

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.

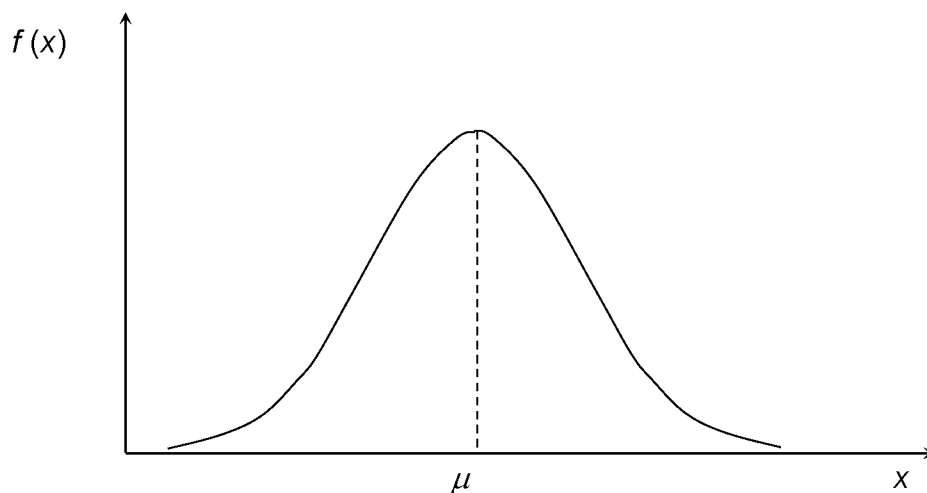
### 3 Função densidade de probabilidade Normal

A função densidade de probabilidade Normal (FIGURA A.1.3) é dada por:

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

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 A.1.3 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE NORMAL.



Fonte: Souza (2018)

A função distribuição é obtida com a expressão:

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

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.

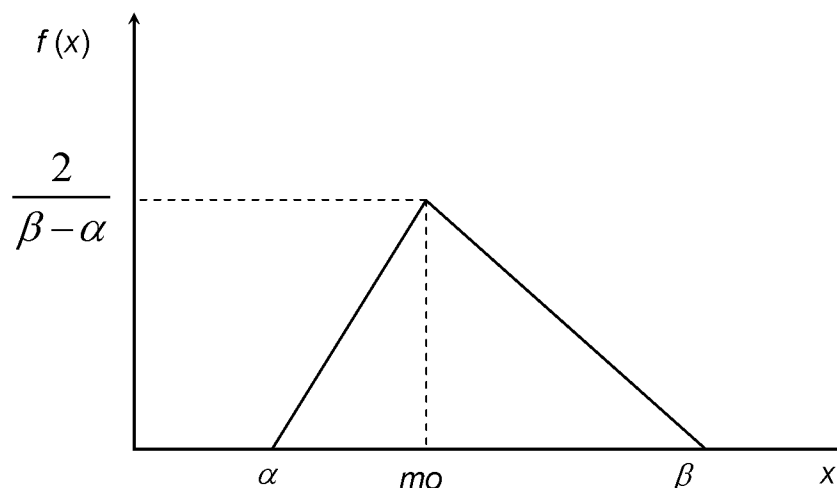
#### 4 Função densidade de probabilidade Triangular

A função densidade de probabilidade Triangular (FIGURA A.1.4) 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 A.1.4 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE TRIANGULAR



Fonte: Souza (2018)

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.

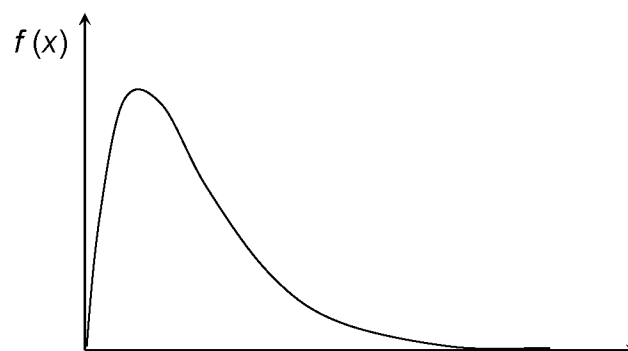
## 5 Função densidade de probabilidade Gama

A função densidade de probabilidade Gama (FIGURA A.1.5) 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 A.1.5 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE GAMA.



Fonte: Souza (2018)

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.

## REFERÊNCIAS

JERSZURKI, D. **Caracterização das relações hídricas para a cultura do Pinus taeda no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

SOUZA, J. L. M. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados**: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR; 2018.

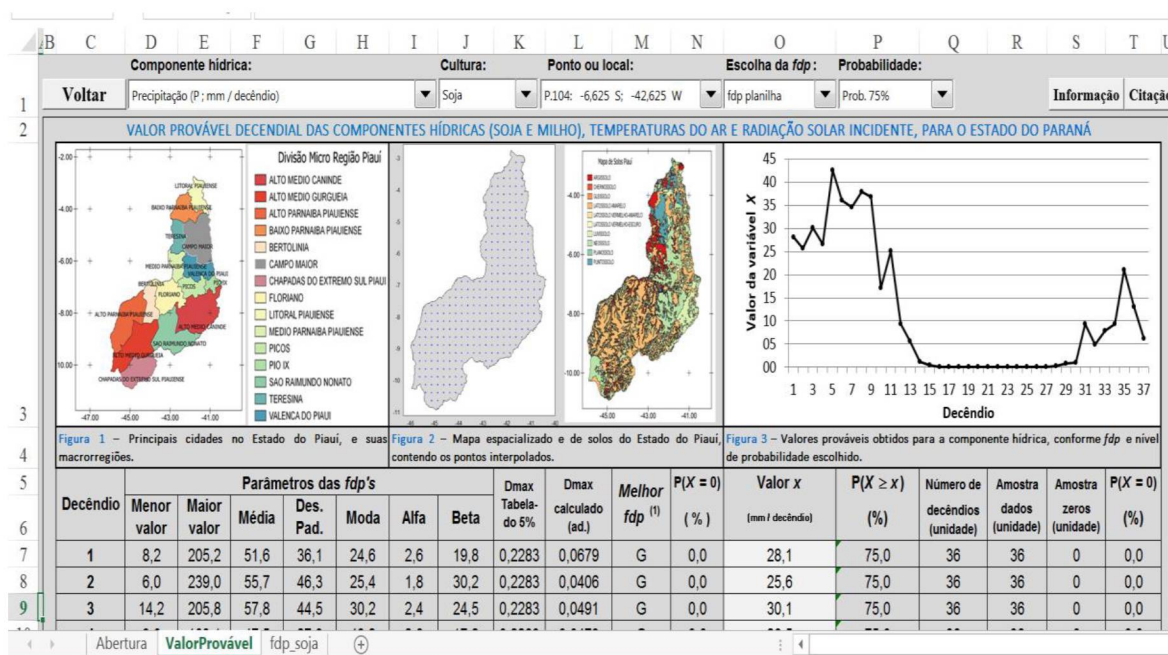
## APÊNDICE 2 – PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE

Os parâmetros das funções densidade de probabilidade de melhor ajuste obtidos no presente trabalho encontram-se em uma planilha desenvolvida para o cálculo dos valores prováveis de precipitação ( $P$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), evapotranspiração real ( $ET_r$ ), armazenamento de água no solo na zona da raiz ( $S$ ) e deficiência hídrica ( $Def$ ), com qualquer nível probabilidade e em diferentes localidades (latitude x longitude) do Estado do Piauí.

O usuário poderá realizar o download da planilha e ter acesso no seguinte link: <[http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes.htm#6\\_1orientacao\\_mestrado](http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes.htm#6_1orientacao_mestrado)>.

Como parâmetros possíveis de opção, o usuário pode escolher as componente hídrica ( $P$ ,  $ET_0$ ,  $ET_r$ ,  $S$ ,  $Def$ ), localidade no Estado do Piauí (coordenadas latitude x longitude), função densidade de probabilidade (a de melhor ajuste ou uma especificamente) e probabilidade de ocorrência (1 a 99%) (FIGURA A.2.1).

FIGURA A.2.1 – PLANILHA CONTENDO OS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE OBTIDOS PARA AS COMPONENTES HÍDRICAS ( $P$ ,  $ET_0$ ,  $ET_r$ ,  $S$ ,  $Def$ ), E REALIZAR O CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA, EM DETERMINADA LOCALIDADE NO ESTADO DO PIAUÍ (COORDENADAS LATITUDE X LONGITUDE).



Fonte: O autor (2018)

## APÊNDICE 3 – PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA

As considerações dispostas nesse Apêndice são básicas para o cálculo do balanço hídrico agrícola no AquaCrop. O apêndice foi constituído por Gurski (2018), baseando-se nas referências que se encontram citadas ao longo do texto. Gurski (2018) considerou também que existem módulos adicionais em Raes et al. (2016) que descrevem outros cálculos como estimativa da produtividade de culturas agrícolas, estresses em decorrência de temperatura, falta de aeração, fertilidade, salinidade, entre outros, que podem auxiliar na especificação do meio em que o balanço hídrico é realizado.

### 1 Armazenamento de água no solo na zona radicular

$$S = 1000 \cdot \theta \cdot z$$

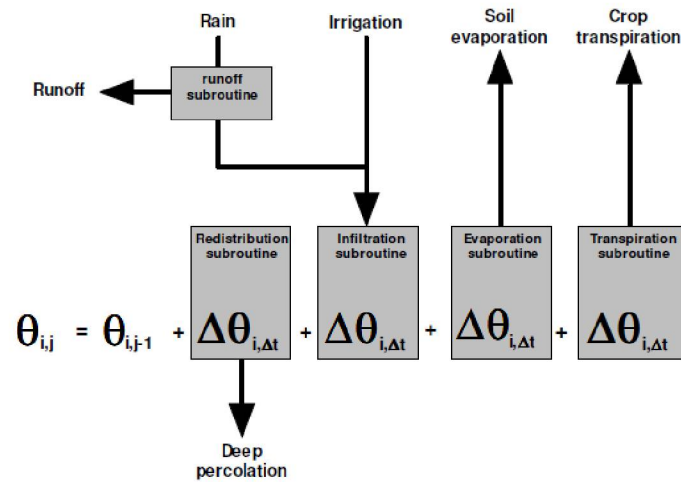
Sendo:  $S$  – armazenamento de água do solo na zona radicular (mm);  $\theta$  – umidade volumétrica média na zona radicular ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $z$  – profundidade efetiva do sistema radicular (m).

#### 1.1 Umidade no solo

A equação de fluxo diferencial foi substituída por um conjunto de equações de diferenças finitas (sub-rotinas), escritas em termos da variável dependente  $\theta$  (FIGURA A.3.1). A simulação começa com a drenagem do perfil do solo. Posteriormente, a água se infiltra (após a subtração do escoamento superficial) e, finalmente, calcula-se a quantidade de água perdida pela evaporação do solo e transpiração da cultura. Em cada uma das sub-rotinas descritas, a umidade do solo é atualizada no final do tempo ( $j$ ) e em cada camada ( $i$ ), de acordo com a variação calculada da umidade ( $\Delta\theta$ ).



FIGURA A.3.1. CÁLCULO DA UMIDADE DO SOLO NO MODELO AQUACROP



FONTE: Raes et al. (2016)

## 1.2 Profundidade efetiva do sistema radicular

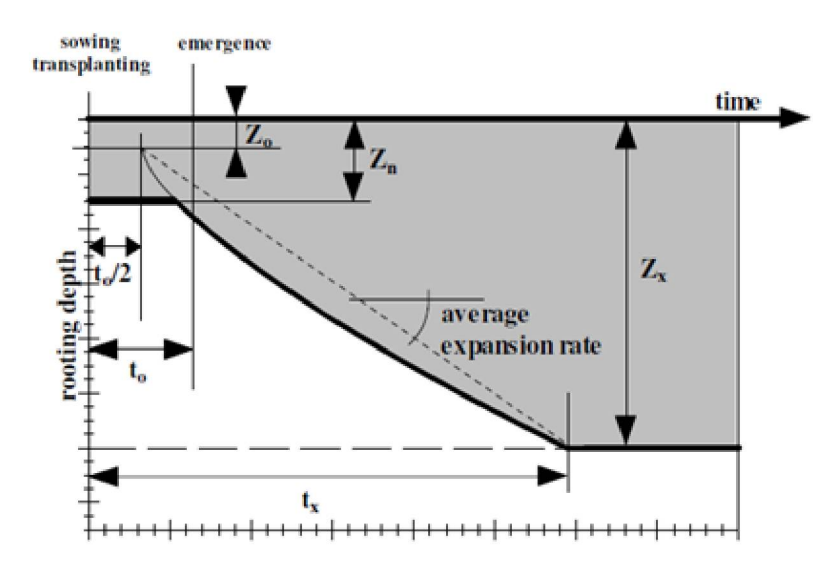
O desenvolvimento da  $z$  é função do tempo e tipo de cultura. A profundidade de enraizamento começa a aumentar da profundidade inicial até a profundidade efetiva do sistema radicular máxima ser atingida:

$$z_i = z_o + (z_m - z_o) \cdot \sqrt[n]{\frac{t_i - t_o}{t_f - t_o}} \quad \text{em que } z_o \leq z \leq z_m$$

Sendo:  $z_i$  – profundidade efetiva do sistema radicular no  $i$ -ésimo dia (m);  $z_o$  – profundidade inicial do sistema radicular (m);  $z_m$  – profundidade efetiva máxima do sistema radicular (m);  $t_i$  – tempo após plantio (dias ou graus dia acumulado);  $t_o$  – tempo para chegar a 90% da emergência da cultura (dias ou graus dia acumulado);  $n$  – fator de forma.

O fator de forma  $n$ , que é específico da cultura, determina a velocidade decrescente da expansão da zona radicular no tempo. Para valores maiores que 1, a expansão da  $z$  é mais importante após o plantio do que posteriormente. Quanto maior o valor de  $n$ , maior a discrepância entre as taxas de expansão no início e no final do período. A  $z$  é constante (linear) quando  $n = 1$  (FIGURA A.3.2). A taxa média de expansão da  $z$  nunca pode exceder o valor máximo (fixado a  $0,05 \text{ m dia}^{-1}$ ).

FIGURA A.3.2. DESENVOLVIMENTO DA PROFUNDIDADE EFETIVA DO SISTEMA RADICULAR ( $z$  – ÁREA CINZA) DO PLANTIO À PROFUNDIDADE EFETIVA MÁXIMA ( $z_m$ ).



FONTE: Raes et al. (2016)

### 1.3 Drenagem profunda

O AquaCrop utiliza a função exponencial para simular a redistribuição de água em cada camada de solo, drenagem do perfil de solo e infiltração devida a precipitação e/ou irrigação (Raes, 1982; Raes et al., 1988; Raes et al., 2006):

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau \cdot (\theta_s - \theta_{cc}) \cdot \frac{e^{\theta_i - \theta_{cc}} - 1}{e^{\theta_s - \theta_{cc}} - 1}$$

$$\text{Se } \theta_i = \theta_{cc} \quad \text{então:} \quad \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = 0;$$

$$\text{Se } \theta_i = \theta_s \quad \text{então:} \quad \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau \cdot (\theta_s - \theta_{cc})$$

Sendo:  $\Delta\theta/\Delta t$  – habilidade de drenagem na  $i$ -ésima camada, durante a variação em  $t$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{dia}^{-1}$ );  $\tau$  – característica de drenagem do solo (adimensional);  $\Delta\theta_i$  – variação da umidade do solo na  $i$ -ésima camada ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_s$  – umidade do solo na saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_{cc}$  – umidade do solo na capacidade de campo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\Delta t$  – variação no tempo (dia).

A característica de drenagem do solo ( $\tau$ ) expressa a diminuição da umidade da camada de solo, originalmente na saturação, no final do primeiro dia de

drenagem livre. É expressa como uma fração da quantidade drenável total de água, que é a unidade entre a saturação e a capacidade de campo. Quanto maior for o  $t$ , mais rápida a camada de solo atingirá a capacidade de campo (BARRIOS GONZALES, 1999):

$$0 \leq (\tau = 0,0866 \cdot K_{sat}^{0,35}) \leq 1$$

Sendo:  $K_{sat}$  – condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{mm dia}^{-1}$ )

Em um solo uniforme igualmente úmido, supõe-se que a diminuição da umidade do solo por dia ( $\Delta\theta/\Delta t$ ) é constante ao longo do perfil de drenagem. A quantidade de água (mm) que percola além do perfil do solo no final de cada dia é dada por:

$$DP = 1000 \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$

Sendo:  $DP$  – conteúdo de água no solo drenado do perfil de solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\Delta\theta/\Delta t$  – habilidade de drenagem ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{dia}^{-1}$ );  $\Delta z$  – variação na profundidade do solo (m);  $\Delta t$  – variação no tempo (dia).

#### 1.4 escoamento superficial

A estimativa da quantidade de precipitação perdida por escoamento superficial baseia-se na equação de uma curva (USDA, 1964; RALLISON, 1980; STEENHUIS et al., 1995):

$$ES = \frac{(P - 0,2 \cdot S_p)^2}{P + S_p - 0,2 \cdot S_p}$$

$$S_p = 254 \cdot \left( \frac{100}{cc} - 1 \right)$$

Sendo:  $ES$  – escoamento superficial (mm);  $P$  – precipitação (mm);  $S_p$  – potencial máximo de armazenamento de água no solo (mm);  $cc$  – coeficiente de curvatura (adimensional).

Um solo com coeficiente de curvatura ( $cc$ ) elevado terá pequeno potencial de armazenamento ( $S_p$ ) e poderá perder grande quantidade de precipitação por

escoamento. O  $cc$  do solo é função da textura, declive, uso da terra e umidade relativa superior do solo (TABELA A.3.1).

TABELA A.3.1. VALORES INDICATIVOS DO COEFICIENTE DE CURVATURA ( $cc$ ) PARA DIFERENTES UMIDADES E TAXAS DE INFILTRAÇÃO.

Umidade do Solo	----- Taxa de Infiltração (mm dia <sup>-1</sup> ) -----			
	< 10	10 a 50	50 a 250	> 250
$\theta = \theta_{PMP}$	70	63	56	45
$\theta = (\theta_{CC} + \theta_{PMP}) / 2$	85	80	75	65
$\theta = \theta_{CC}$	93	91	88	84

FONTE: Smedema e Rycroft (1973)

### 1.5 Infiltração da água no solo

Após a subtração do escoamento superficial, a água restante da precipitação e/ou irrigação se infiltra no perfil do solo. A quantidade de água que se infiltra no perfil do solo é armazenada em compartimentos sucessivos de cima para baixo, não excedendo assim o limite de conteúdo de água no solo  $\theta^{\circ}_i$  (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>).

$$Inf = P + I - ES, \quad \text{tal que:} \quad Inf \leq (1000 \cdot \theta^{\circ}_i) \leq (1000 \cdot \theta_s)$$

Sendo:  $Inf$  – infiltração de água no perfil do solo (mm);  $P$  – precipitação (mm);  $I$  – irrigação (mm);  $\theta^{\circ}_i$  – limite de conteúdo de água no solo na  $i$ -ésima camada (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>).

O limite  $\theta^{\circ}_i$  em uma profundidade de solo particular depende da taxa de infiltração da camada de solo correspondente e da quantidade de água infiltrada que ainda não está armazenada no perfil do solo. A taxa de drenagem em  $\theta^{\circ}_i$  deve corresponder à quantidade de água que ainda tem de passar através do compartimento durante o dia. Se o fluxo exceder a taxa de infiltração máxima da camada de solo correspondente ( $\theta^{\circ}_i = \theta_s$ ), a água extra será armazenada nos compartimentos acima, até que a parte restante, que tem de passar através do compartimento por unidade de tempo seja igual à taxa de infiltração máxima.

O procedimento de cálculo não é completamente independente da espessura das camadas do solo. No entanto, a estimativa simula o processo de infiltração, levando em consideração a umidade inicial do perfil do solo, a quantidade de água que se infiltra durante o tempo, a taxa de infiltração e as características de drenagem das diferentes camadas do solo do perfil do solo.

## 1.6 Ascensão capilar

A ascensão capilar é estimada considerando o tipo de solo e suas características hidráulicas. A relação entre a ascensão capilar e a profundidade do lençol freático é dada pela equação exponencial:

$$AC = \exp\left(\frac{\ln(z_L) - b}{a}\right)$$

Sendo:  $AC$  – ascensão capilar ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $z_L$  – profundidade do lençol freático abaixo da superfície do solo (m);  $a$  e  $b$  – parâmetros específicos do tipo de solo e suas características hidráulicas.

Como a magnitude da ascensão capilar é fortemente afetada pela forma da curva de retenção de água no solo e pela relação entre condutividade hidráulica e potencial da água, os parâmetros  $a$  e  $b$  da equação variam com a classe textural do solo. Para maiores informações consultar Janssens (2006).

## 1.7 Evaporação do solo

A evaporação do solo ( $E$ ) é calculada considerando o coeficiente de evaporação da água do solo ( $Ke$ ) e o efeito do estresse hídrico (RITCHIE, 1972):

$$E = (Kr \cdot Ke) \cdot ETo$$

Sendo:  $E$  – evaporação do solo (mm);  $Kr$  – coeficiente de redução da evaporação (adimensional);  $Ke$  – coeficiente de evaporação do solo (adimensional);  $ETo$  – evapotranspiração de referência.

Quando  $Kr < 1$ , reduz a evaporação do solo, ou seja, quando há água insuficiente no solo para responder à demanda por evaporação da atmosfera. O  $Ke$  é proporcional à fração da superfície do solo não coberta pelo dossel ( $1 - CD$ ) (FIGURA A.3.3).

O fator proporcional é o coeficiente máximo de evaporação do solo ( $Kex$ ), que integra os efeitos das características que distinguem a evaporação do solo da evapotranspiração da superfície de referência do dossel.

$$0 \leq \left( Kr = \frac{\exp^{f_K \cdot W_{rel}} - 1}{\exp^{f_K} - 1} \right) \leq 1$$

Sendo:  $f_K$  – fator de declínio (adimensional);  $W_{rel}$  – conteúdo de água relativo da camada de solo em que a água se move para a camada de superfície do solo evaporando (camada superior do solo com espessura  $z_i = 0,15$  m, quando não atribuído outro valor).

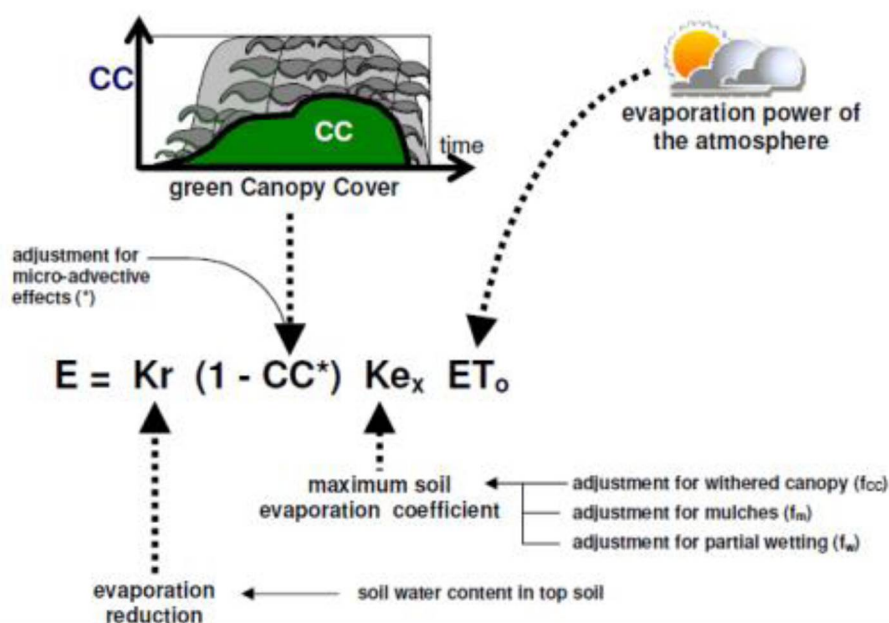
$$Ke = (1 - CD) \cdot Kex$$

$$(1 - CD) = (1 - 1,72 \cdot CD + CD^2 - 0,30 \cdot CD^3) \geq 0$$

Sendo:  $CD$  – cobertura do dossel (%);  $Kex$  – coeficiente de evaporação máxima do solo (adimensional).

Quando a cobertura do dossel ( $CD$ ) se expande na fase de desenvolvimento da planta, o  $Ke$  diminui gradualmente.

FIGURA A.3.3. COMPONENTES DA EVAPORAÇÃO DO SOLO NO AQUACROP.



FONTE: Raes et al. (2016)

## 1.8 Transpiração da cultura

A transpiração da cultura ( $T$ ) é calculada considerando o coeficiente de transpiração da cultura e o efeito do estresse hídrico:

$$T = (K_s \cdot K_{c_T}) \cdot ETo$$

Sendo:  $T$  – transpiração da cultura (mm);  $K_s$  – coeficiente de estresse hídrico do solo (adimensional);  $K_{c_T}$  – coeficiente de transpiração (adimensional).

Quando  $K_s < 1$  há água insuficiente na zona radicular para responder à demanda evaporativa da atmosfera e a transpiração da cultura reduz. Para maiores informações sobre  $K_s$  verificar o tópico sobre estresse hídrico em Raes et al. (2016). O  $K_{c_T}$  é proporcional à cobertura verde do dossel ( $CD$ ).

$$K_{c_T} = CD \cdot K_{c_{Tx}}$$

Sendo:  $K_{c_{Tx}}$  – coeficiente para máxima transpiração da cultura (solo bem irrigado e copa completa,  $CD = 1$ ) (adimensional).

O  $K_{c_{Tx}}$  integra os efeitos das características que distinguem a transpiração da cultura da evapotranspiração da superfície de referência do dossel. Devido às diferenças no albedo, altura da cultura, propriedades aerodinâmicas, propriedades das folhas e estômatos, o  $K_{c_{Tx}}$  difere de 1, sendo: frequentemente 5 a 10% maior do que a  $ETo$ ; e, até 15 a 20% maior para culturas altas, como milho, sorgo ou cana-de-açúcar. O  $K_{c_{Tx}}$  é aproximadamente equivalente ao coeficiente basal de colheita na meia-estação para diferentes culturas (ALLEN et al., 1998), mas apenas para casos de  $CD$  completa.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. **Crop evapotranspiration**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper n. 56, 1998.

BARRIOS GONZALES, J. M. Comparative study of three approaches in the computation of soil water balance. **Master Dissertation Leuven**: K.U. Leuven University, p 93. 1999.

GURSKI, B. C. **Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná**. 132 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

JANSSENS, P. Invloed van een ondiepe grondwatertafel op de planning van irrigaties voor intensieve groenteteelt. **Master dissertation**, Fac. Bio-ingenieurswetenschappen, Leuven: K.U. Leuven University, p. 89. 2006.

RAES, D. **A summary simulation model of the water budget of a cropped soil**. 110 f. Dissertation, Leuven: K.U. Leuven University. 1982.

RAES, D.; LEMMENS, H.; VAN AELST, P.; VANDEN BULCKE, M.; SMITH, M. **IRIS: Irrigation scheduling information system**. Leuven: K.U. Leuven University, Reference Manual 3, 199 p. 1988.

RAES, D.; GEERTS, S.; KIPKORIR, E.; WELLENS, J.; SAHLI, A. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. **Agricultural Water Management**, v. 81, p. 335-357. 2006.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **AquaCrop version 5.0 reference manual**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.

RALLISON, R. E. Origin and evolution of the SCS runoff equation. **Symposium on watershed management**, New York: ASCE, p. 912-924. 1980.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, p. 1204-1213. 1972;

SMEDEMA, L. K., RYCROFT, D. W. **Land drainage: planning and design of agricultural drainage systems**. London: Batsford Ltd., 1973.

STEENHUIS, T. S.; WINCHELL, M.; ROSSING, J.; ZOLLWEG, J. A.; WALTER, M. F. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 121, p. 234-238. 1995.

USDA. Estimation of direct runoff from storm rainfall. Section 4 Hydrology, Chapter 4: **National Engineering Handbook**, Washington, p. 1-24. 1964.



## APÊNDICE 4 – PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PARA A CULTURA DA SOJA, NO ESTADO DO PIAUÍ

TABELA A.4.1. PARÂMETROS DOS SOLOS DO ESTADO DO PIAUÍ UTILIZADOS NO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA.

Solo/Textura	Profundidade (m)	* $\theta_{pmp}$	* $\theta_{cc}$	* $\theta_s$	* $K_s$ (mm dia <sup>-1</sup> )	* $AFE$ (mm)	* $cc$ (adimensional)	* $a$	* $b$
		m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>							
Argissolo argiloso	1,5	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,60	0,59
Argissolo médio	1,5	0,27	0,39	0,47	35	10	77	-0,56	-1,61
Argissolo arenoso/médio	1,5	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,57	-0,51
Argissolo argiloso/médio	1,5	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,60	0,59
Chernossolo argiloso/médio	1,0	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,60	0,59
Gleissolo arenoso/médio	1,5	0,10	0,22	0,41	1200	7	46	-0,32	0,21
Gleissolo argiloso	1,5	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,60	0,59
Latossolo argiloso	2,0	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,60	0,59
Latossolo médio	2,0	0,27	0,39	0,50	25	10	77	-0,56	-1,61
Luvissolo argiloso/médio	1,0	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,60	0,59
Neossolo médio	0,5	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,57	0,51
Neossolo arenoso	0,5	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,57	-0,51
Neossolo arenoso/médio	0,5	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,57	-0,51
Planossolo arenoso/médio	1,2	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,57	-0,51
Plintossolo arenoso médio	2,0	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,57	-0,51
Plintossolo argiloso médio	2,0	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,60	0,59
Plintossolo médio	2,0	0,27	0,39	0,50	35	10	77	-0,56	-1,61

FONTE: adaptado do Mapa Exploratório de Reconhecimento de Solos do Estado do Piauí Embrapa (1984) e Raes et al. (2018).

\*  $\theta_{PMP}$  – umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente;  $\theta_{CC}$  – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo;  $\theta_s$  – umidade volumétrica do solo na saturação;  $K_s$  – condutividade hidráulica do solo saturado;  $AFE$  – água facilmente evaporável;  $cc$  – coeficiente de curvatura (APÊNDICE 3);  $a$  e  $b$  – parâmetros hidráulicos do solo (APÊNDICE 3).

TABELA A.4.2 – PARÂMETROS DA CULTURA DA SOJA UTILIZADOS NO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA.

----- Parâmetro -----	Soja
Ciclo (dias)	365
Estádio de desenvolvimento I – semeadura a emergência (dias)	1
Estádio de desenvolvimento II – crescimento vegetativo a florescimento (dias)	363
Estádio de desenvolvimento III – senescência (dias)	364
Estádio de desenvolvimento IV – maturação (dias)	365
Dossel (plantas ha <sup>-1</sup> )	300.000
Temperatura base inferior (°C)	13
Temperatura base superior (°C)	40
Fração de água disponível no solo ( $p$ ) na camada superior do solo (adimensional)	0,20
Fração de água disponível no solo ( $p$ ) na camada inferior do solo (adimensional)	0,50
Porosidade livre de aeração mínima ( $\beta_{min}$ ) (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,10
Coefficiente de cultivo máximo ( $Kc_{Tx}$ ) (adimensional)	1,10
Profundidade inicial do sistema radicular ( $z_o$ ) (m)	0,10
Profundidade efetiva máxima do sistema radicular ( $z_m$ ) (m)	0,40
Fator de forma ( $n$ ) (adimensional)	15
Cobertura do dossel máxima ( $CDm$ ) (%)	85

FONTE: adaptado de Allen et al. (1998).

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. **Crop evapotranspiration**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper n. 56. 1998.

EMBRAPA – **Mapa exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Piauí**. 1984. Escala 1:1.000.000.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop version 6.0 reference manual. Rome: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. 2018.