

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



Tese de Doutorado

BERGSON GUEDES BEZERRA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NO ALGODOEIRO
IRRIGADO NA CHAPADA DO APODI SEGUNDO SIMULAÇÕES DO
MODELO SWAP**

Campina Grande, Março de 2011



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**



TESE DE DOUTORADO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NO ALGODOEIRO
IRRIGADO NA CHAPADA DO APODI SEGUNDO SIMULAÇÕES DO
MODELO SWAP**

BERGSON GUEDES BEZERRA

CAMPINA GRANDE - PB

Março de 2011

BERGSON GUEDES BEZERRA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NO ALGODOEIRO
IRRIGADO NA CHAPADA DO APODI SEGUNDO SIMULAÇÕES DO
MODELO SWAP**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia

Linha de Pesquisa: Necessidades hídricas de cultivos irrigados

Orientador: Dr. Bernardo Barbosa da Silva (UFCG – CTRN – UACA)

CAMPINA GRANDE

Março de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B574a Bezerra, Bergson Guedes

Avaliação da Eficiência de uso da Água no Algodoeiro irrigado na Chapada do Apodi segundo Simulações do Modelo SWAP / Bergson Guedes Bezerra. — Campina Grande, 2011.

139 f. : il. col.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva.

1. Evapotranspiração. 2. Déficit de irrigação. 3. Balanço de energia. 4. Razão de Bowen. 5. Equação de Richards. 6. Parâmetros de Van Genuchten. I. Título.

CDU-551.573(043)

BERGSON GUEDES BEZERRA

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE USO DE ÁGUA NO ALGODOEIRO
IRRIGADO NA CHAPADA DO APODI SEGUNDO SIMULAÇÕES DO MODELO
SWAP

TESE APROVADA EM 03/03/2011

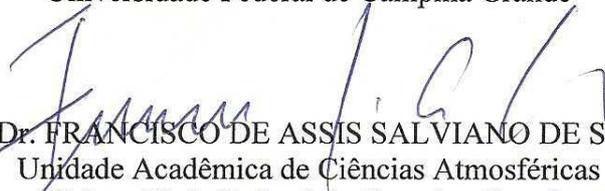
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ DANTAS NETO
Doutorado em Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande



Dr. JOSÉ RENATO CÔRTEZ BEZERRA
Centro Nacional de Pesquisa do Algodão
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

*Se não houver frutos
valeu a intenção das flores.
Se não houver flores
valeu a sombra das folhas.
Se não houver folhas
valeu a intenção da semente.*

Henfil

A minha esposa Cleide pelo apoio incondicional e pela compreensão para com as minhas inquietações e muitas ausências de casa durante toda essa jornada, DEDICO

Aos meus pais, Nicinha e Luiz Guedes (In Memoriam) e a Joana Lourenço pelo apoio incondicional e confiança, OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela bênção da vida e pela Graça da sabedoria, indispensável na condução e conclusão com êxito de mais essa jornada em minha vida;

A Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela confiança em mim depositada.

Ao professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva pela indispensável orientação e pelos ensinamentos propiciados.

Aos professores da UACA que nos propiciaram os conhecimentos indispensáveis para a realização desse trabalho, quais sejam: Dr. Bernardo Barbosa da Silva, Dr. Pedro V. de Azevedo e Dr. Kamada Karuna Kumar.

Aos funcionários da UACA/UFCG.

Ao CNPq/CT-HIDRO pela concessão da bolsa de estudos.

A EMBRAPA-Algodão por acreditar em nossa proposta.

Ao corpo de pesquisadores da EMBRAPA-Algodão, Dr. José Renato Cortez Bezerra, Dr. José da Cunha Medeiros, e Dr. Valdinei Sofiatti.

Ao Dr. Quirijn de Jong Van Lier (USP/ESALQ) e aos seus alunos Alexandre Hugo César Barros e Fabio Vale Scarpore pelo suporte técnico no processo de calibração e validação do modelo SWAP-WOFOST.

Aos colegas de pós-graduação, principalmente aqueles que tivemos uma convivência mais aproximada, quais sejam: Saulo Tasso, Rafael Ferreira, Valéria Peixoto, Marcus Vinícius e Ziany Neiva.

Ao amigo Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos, pela amizade e pela confiança.

A minha família e a minha amada esposa (Maricleide Soares Firmino) pelos incondicionais apoios nos concedidos e pela compreensão com as minhas inquietações durante toda essa jornada.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta colaboraram com o nosso trabalho.

Em fim, a todos nosso MUITO OBRIGADO!!!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1.0 – INTRODUÇÃO.....	14
2.0 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 – A cultura do algodão.....	18
2.2 – Evapotranspiração real das culturas – ET _c	21
2.3 – Métodos de medidas e/ou estimativas da ET _c	23
2.4 – O Modelo SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) – Teoria.....	30
2.4.1 – A Equação de Darcy.....	32
2.4.2 – A Equação de Richards.....	34
2.4.3 – Módulos de simulações do crescimento vegetativo.....	38
2.4.4 – Aplicações do modelo SWAP no mundo.....	40
2.5 – Desempenho do modelo SWAP.....	43

2.6 – Eficiência do uso da água na irrigação.....	44
3.0 – MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.1 – Área de estudo.....	50
3.2 – O modelo SWAP.....	52
3.2.1 – Evapotranspiração da Cultura.....	54
3.2.2 – Produtividade do algodoeiro.....	57
3.2.3 – Estágio de desenvolvimento da cultura.....	59
3.3 – Calibração do SWAP-WOFOST.....	60
3.3.1 – Funções hidráulicas do solo.....	60
3.3.2 – Parâmetros da cultura.....	61
3.3.3 – Análise de Sensibilidade.....	62
3.4 – Campanhas Experimentais.....	63
3.4.1 – Práticas Culturais e Irrigação.....	63
3.4.2 – ETC do algodão.....	64
3.4.3 – Curva do K_c	66
3.4.4 – Teor de água no solo.....	68
3.4.5 – Altura, biomassa e área foliar das plantas.....	68

3.4.6 – Produtividade das culturas.....	69
3.5 – Eficiência de Uso da Água (EUA).....	69
3.6 – Análise Estatística – Calibração e validação do modelo SWAP....	69
3.7 – Tratamento de água – Aplicação do modelo SWAP.....	71
4.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1 – Evapotranspiração de Referência e Evapotranspiração da Cultura.....	73
4.2 – Coeficiente de Cultura – observações de campo.....	79
4.3 – Simulações do SWAP – calibração e validação.....	82
4.3.1 – Parâmetro de VGM e da cultura e análise de sensibilidade	82
4.3.2 – Evapotranspiração, produtividade e IAF.....	85
4.3.3 – Teor de água no solo (θ).....	90
4.4 – Tratamento de irrigação – Simulações do SWAP.....	93
5.0 – CONCLUSÕES.....	110
6,0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1:** Microscopia eletrônica de varredura dos estômatos: a) distribuídos na superfície da folha (estruturas circulares), e em duas situações distintas: b) aberto, indicando a plena atividade de transpiração da planta e c) fechado, indicando condição de estresse hídrico..... 23
- Figura 2.2:** Comportamento geral da relação entre a irrigação aplicada, E_{Tc} e o rendimento da cultura. I_w indica o ponto além do qual a EUA da irrigação começa a diminuir, e I_M indica o ponto além do qual o rendimento não aumenta mesmo com a aplicação adicional de água (Fonte: Fereres e Soriano, 2007)..... 49
- Figura 3.1:** Localização da área experimental em relação ao Brasil (retângulo vermelho), e mapa de elevação digital da região em torno da Chapada do Apodi..... 51
- Figura 3.2:** Coeficiente de redução para extração de água pelo sistema radicular, α_w , como função da pressão matricial de água no solo (h) e a taxa de transpiração potencial (T). Adaptado de Kroes et al. (2008)..... 55
- Figura 3.3:** coeficiente de redução para extração de água pelas raízes, α_{rs} , como função da condutividade elétrica da água no solo. Adaptado de Kroes et al. (2008)..... 56
- Figura 3.4:** Representação simplificada dos processos de desenvolvimento e crescimento de culturas incorporado ao módulo detalhado do modelo SWAP. Adaptado de Kroes et al. (2008)..... 58

Figura 3.5: Representação simplificada dos estágios de desenvolvimento da cultura considerado no WOFOST. Adaptado de Kroes et al. (2008).....	59
Figura 3.6: A fotografia da esquerda apresenta a torre micrometeorológica destinada ao BERB instalada no campo de algodão em Apodi-RN, enquanto que a da direita mostra momento da coleta dos dados.....	66
Figura 3.7: Coleta de dados de umidade de solo com a sonda PR2.....	68
Figura 4.1: Lâmina total de água aplicada em cada irrigação nas campanhas experimentais de 2008 e 2009.....	76
Figura 4.2: ET _c diária do algodão herbáceo (cultivar BRS 187 8H) irrigado em Apodi-RN nos anos de 2008 e 2009.....	77
Figura 4.3: Curvas do kc do algodoeiro irrigada na Chapada do Apodi-RN para os anos de 2008 e 2009.....	81
Figura 4.4: Curva do kc apresentada em médias de cada 5 dias versus o DAE ajustada a um polinômio de segundo grau. As barras verticais indicam o desvio padrão de cada média.....	82
Figura 4.5: Análise de sensibilidade dos parâmetros hidráulicos do solo (RMSE da transpiração modelado como uma função dos parâmetros de VGM).....	84
Figura 4.6: Valores da ET _c acumulada 10 dias obtida pela técnica de BERB e simulada pelo SWAP no dois anos estudados.....	86

Figura 4.7: Produtividade do algodoeiro simulada pelo SWAP-WOFOST e observada em campo em Apodi-RN nos anos de 2008 e 2009.....	88
Figura 4.8: Curva do IAF simulada pelo SWAP-WOFOST e valores obtidos em campo.....	89
Figura 4.9: Teor de água no solo simulado pelo SWAP e observado em campo através da sonda PR2 em a) 10 cm b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm e e) 60 cm.....	91
Figura 4.10: Comportamentos do IAF do algodoeiro nos diferentes tratamentos de irrigação, simulados pelo SWAP-WOFOST.....	94
Figura 4.11: Evolução temporal da evapotranspiração relativa (ET_c/ET_{pot}^{-1}) da cultura do algodoeiro.....	96
Figura 4.12: (a) Relação entre os valores médios da ET_c e da produtividade do algodoeiro com a irrigação aplicada e (b) relaciona a produtividade versus a irrigação aplicada.....	98
Figura 4.13: Fator resposta da cultura do algodão ao estresse hídrico.....	100
Figura 4.14: Relação entre os valores da EUA_{ET} e da EUA_{irr} com a lâmina de irrigação aplicada em cada tratamento.....	102
Figura 4.15: Variação temporal do fluxo de água em diferentes profundidades do perfil do solo em cada tratamento estudado, simulados pelo SWAP.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Parâmetros de entrada do módulo de simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura.....	62
Tabela 3.2: Critérios para avaliação de desempenho segundo o índice de confiança c.....	71
Tabela 4.1: Radiação solar (RS), temperatura do ar (Tar), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a 2 m (u_2), evapotranspiração de referência (ET_0) e o déficit de pressão de vapor (DPV) observados durante o ciclo fenológico do algodoeiro em Apodi-RN em ambas as campanhas experimentais.....	74
Tabela 4.2: Datas da emergência e da maturação total e do GDD requerido pelo algodoeiro em Apodi-RN.....	75
Tabela 4.3: Evapotranspiração de referência e irrigação totais.....	76
Tabela 4.4: Valores do k_c determinados experimentalmente para o algodão irrigado em Apodi-RN.....	80
Tabela 4.5: Totais de irrigação aplicada e ET_0 média observada durante os estádios inicial, médio e final do algodoeiro em Apodi-RN.....	81
Tabela 4.6: Parâmetros de VGM e condutividade hidráulica para uma condição saturada.....	83
Tabela 4.7: Principais parâmetros da cultura do algodão especificados ao SWAP-WOFOST.....	83

Tabela 4.8: Análise estatística da diferença entre a ET _c do algodoeiro obtida pela técnica de BERB e simulada pelo SWAP nos dois anos estudados.....	87
Tabela 4.9: Análise estatística da diferença entre a produtividade da cultura simulada pelo SWAP e observada em campo.....	88
Tabela 4.10: Análise estatística da comparação entre IAF medido em campo e simulado pelo SWAP-WOFOST.....	90
Tabela 4.11: Análise estatística da comparação entre teor de água no solo simulado pelo SWAP e observações de campo. O valor crítico do teste t-Student para $p < 0,05$ é igual a 1,97.....	92
Tabela 4.12: Produtividade (Prod), lâmina de irrigação (Irr) e evapotranspiração do algodoeiro (ET _c) em cada um dos tratamentos de irrigação simulados pelo SWAP-WOFOST em 2008 e 2009.....	95
Tabela 4.13: Eficiência de Uso da Água obtida em termos da evapotranspiração (EUA _{ET}) e da irrigação (EUA _{Irr}) em cada tratamento simulados pelo SWAP-WOFOST nos dois anos estudados	101
Tabela 4.14: Comparação dos valores da EUA _{ET} e da EUA _{Irr} com outros estudos.....	106

Tabela 4.15: Comparação entre a produtividade do algodoeiro obtida em Apodi-RN com outros estudos.....	109
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
γ	Constante psicrométrica	KPa °C ⁻¹
Δe	Gradiente de pressão real de vapor de água acima do dossel	KPa
ϵ_{PAR}	Eficiência do uso da luz	kg h ⁻¹ J ⁻¹ m ⁻²
α_{rd}	Coefficiente de redução devido ao estresse seco	-
θ_{res}	Conteúdo residual de água no solo	cm ⁻³ cm ⁻³
α_{rs}	Coefficiente de redução ao estresse salino	-
θ_{sat}	Conteúdo de água no solo na condição de saturação	cm ⁻³ cm ⁻³
ΔT	Gradiente de temperatura acima do dossel	°C
α_w	Coefficiente de redução devido ao estresse úmido	-
$\ell_{raiz}(z)$	Função da densidade do comprimento radicular	cm ³ cm ⁻³
∇	Gradiente	-
β	Razão de Bowen	-
β_1	Coefficiente de evaporação do solo	cm d ^{-0,5}
Ψ	Potencial total de água no solo	cm
Ψ_g	Potencial gravitacional	cm
Ψ_m	Potencial matricial	cm
Ψ_{os}	Potencial osmótico	cm
Ψ_p	Potencial de pressão	cm
α	Parâmetro de VGM	-
$\theta(h)$	Função do conteúdo de água no solo	-

λ	Fator de tortuosidade do solo	-
A_{\max}	Máxima taxa de assimilação do CO ₂	kg ha ⁻¹ h ⁻¹
$A_{p \text{ gross}}$	Assimilação potencial máxima do CO ₂	kg ha ⁻¹ h ⁻¹
BERB	Balanço de Energia pela Razão de Bowen	-
c	Índice de confiança	-
c_p	Calor específico a pressão constante	J kg ⁻¹ °C ⁻¹
d	Índice de concordância de Willmott	-
DI	Déficit de irrigação	-
D_j	Estágio de desenvolvimento da cultura no dia j	-
DPV	Déficit de pressão de vapor	KPa
D_{raiz}	Espessura da camada do sistema radicular	Cm
E_a	Evaporação real da planta	mm d ⁻¹
EC_{\max}	Nível crítico de salinidade	dS m ⁻¹
EC_{slope}	Declínio por unidade de EC	%dS m ⁻¹
EM	Erro médio	Mesmo da grandeza analisada
EMP (%)	Erro médio percentual	%
E_{pot}	Evaporação potencial do solo úmido	mm d ⁻¹
ET_0	Evapotranspiração de referência	mm dia ⁻¹
ET_c	Evapotranspiração real da cultura	mm dia ⁻¹
ET_c / ET_{pot}	Evapotranspiração relativa	-
ET_m	Evapotranspiração máxima	mm d ⁻¹
ET_{pot}	Evapotranspiração potencial da cultura	mm d ⁻¹
EUA_{ET}	Eficiência de uso da água com base na evapotranspiração	kg m ⁻³

EUA_{irr}	Eficiência de uso da água com base na irrigação	$kg\ m^{-3}$
F	Energia utilizada no processo fotossintético	$W\ m^{-2}$
G	Fluxo de calor no solo	$W\ m^{-2}$
GDD	Grau dias de desenvolvimento acumulado	$^{\circ}C$
H	Fluxo de calor sensível	$W\ m^{-2}$
h	Potenciais de pressão e matricial agrupados	cm
\mathcal{H}	Potencial hidráulico	cm
h1	Pressão acima da qual não há extração de água.	cm
h2	Pressão abaixo da qual a extração de água é ótima.	cm
h3h	Pressão abaixo da qual a absorção de água é reduzida. Início da mais elevada Transpiração potencial	cm
h3l	Pressão abaixo da qual a absorção de água é reduzida (Início da mais baixa transpiração potencial)	cm
h4	Potencial no qual não ocorre nenhuma extração de água pelo sistema radicular da planta (pressão muito baixa)	cm
IAF	Índice de área foliar	-
K	Coeficiente de extinção da luz	-
$K(\theta)$ ou $K(h)$	Funções da condutividade hidráulica do solo não-saturado	-
K_c	Coeficiente de cultura	-
K_{cb}	Coeficiente "basal" de cultura	-
K_{c-fin}	Coeficiente de cultura do estágio final	-
K_{c-ini}	Coeficiente de cultura do estágio inicial	-

K_{c-med}	Coeficiente de cultura do estágio médio	-
K_e	Coeficiente de evaporação do solo	-
K_H	Coeficiente de trocas turbulentas de calor sensível	$m^{-2} s^{-1}$
K_{sat}	Condutividade hidráulica do solo saturado	$cm\ dia^{-1}$
K_w	Coeficientes de trocas turbulentas de vapor de água	$m^2 s^{-1}$
k_y	Fator resposta da cultura ao estresse hídrico	-
LE	Fluxo de calor latente	$W\ m^{-2}$
m	Parâmetro de VGM	-
n	Parâmetro de VGM	-
O_i	Valor observado	Mesma da grandeza em questão
$PAR_{L,a}$	Taxa de radiação absorvida	$J\ m^{-2}\ folha^{-1}\ d^{-1}$
PRI	Irrigação parcial da zona de raiz	-
PROD	Produtividade ou rendimento da cultura	$kg\ ha^{-1}$
q	Fluxo de água no solo	$cm\ dia^{-1}$
r	Coeficiente de Pearson	-
RMSE	Raiz quadrada do erro médio quadrado	Mesma da grandeza avaliada
Rn	Saldo de radiação	$W\ m^{-2}$
S	Calor armazenado na planta	$W\ m^{-2}$
$S_a(h)$	Taxa de extração da água no solo pelo sistema radicular das plantas	$cm^3\ cm^{-3}\ dia^{-1}$
$S_a(z)$	Função da taxa de extração real de pelas raízes	$cm\ d^{-1}$
$S_d(h)$	Taxa de extração da água do solo pela drenagem da zona de saturação	dia^{-1}

S_e	Saturação efetiva	-
S_i	Valor observado	Mesma da grandeza em questão
$S_m(h)$	Taxa de troca com os macro poros	dia ⁻¹
$S_p(z)$	Função da extração potencial de água do solo pelo sistema radicular	cm ³ cm ⁻³
t	Teste t-Student	-
T_a	Transpiração real da planta	mm d ⁻¹
T_b	Temperatura basal	°C
T_B	Temperatura acima da qual ocorre esterilidade dos botões florais	°C
T_j	Temperatura média do dia j	°C
T_{pot}	Transpiração potencial da cultura	mm d ⁻¹
u_2	Velocidade do vento a 2,0 m	m s ⁻¹
UR	Umidade Relativa do ar	%
z	Profundidade no solo	cm

RESUMO

O algodão foi durante o século XX o principal produto agrícola do Semiárido brasileiro. Porém, no início da década de oitenta a cotonicultura entrou em decadência. Essa decadência se deveu principalmente ao barateamento do produto no mercado interno em consequência dos preços subsidiados do mercado internacional. O restabelecimento da cotonicultura é de fundamental importância para o desenvolvimento do Semiárido brasileiro. No entanto, esse restabelecimento está condicionado a adoção de novas tecnologias ao sistema de produção, principalmente relacionados ao uso da água, visto que o cultivo do algodoeiro irrigado minimiza os riscos e maximiza o seu potencial produtivo. Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a eficiência de uso da água do algodoeiro irrigado em uma área do Semiárido brasileiro. O estudo foi realizado mediante a aplicação do modelo SWAP para simular o efeito de diferentes tratamentos de irrigação baseados no déficit de irrigação (DI), na evapotranspiração (ET_c) e na produtividade. A eficiência da irrigação foi avaliada através do indicador Eficiência de Uso da Água (EUA_{ET}) com base na evapotranspiração. O SWAP é um modelo de simulação integrada de base física para o transporte de água, calor e de solutos na zona saturada/insaturada baseada na equação de Richard. O crescimento e desenvolvimento da cultura foram simulados através do módulo detalhado baseado no WOFOST. O modelo foi calibrado com dados oriundos de duas campanhas experimentais, nas quais foi determinada a ET_c por meio da técnica de razão de Bowen. Foram coletadas ainda medidas do teor de água no solo, índice de área foliar e fitomassa. Foram analisados sete tratamentos de água. Os resultados mostraram que o incremento de água na lâmina de irrigação provocou incrementos na ET_c. Por outro lado, a produtividade apresentou incrementos quando submetida a tratamentos baseados no DI e redução de seus valores se a irrigação é abundante. Devido a esse comportamento houve significativa relação polinomial quadrática entre a produtividade e a lâmina de irrigação. Por sua vez, a EUA_{ET} apresentou comportamento similar à produtividade e também apresentou significativa relação quadrática com a irrigação aplicada. O tratamento que apresentou o melhor desempenho foi o T3-75%, cuja lâmina de irrigação corresponde a 75% da irrigação total. O referido tratamento apresentou EUA_{ET} igual a 0,54 kg m⁻³. A faixa de variação da EUA_{ET} dos sete tratamentos estudados variou de 0,39 a 0,54 kg m⁻³.

Palavras chaves: evapotranspiração, déficit de irrigação, balanço de energia, razão de Bowen, equação de Richards, parâmetros de Van Genuchten.

ABSTRACT

Cotton was in the twentieth century the main agricultural product of the Brazilian Semiarid. However, in the early eighties the cotton industry went into decline. This decline was mainly due to the cheapening of the product in the domestic market at subsidized prices as a result of the international market. The revival of cotton production is crucial for the development of the semiarid lands of Brazil. However, this restoration depends on the adoption of new technologies in the production system, mainly related to water use, since the irrigation minimizes risk and maximizes the productive potential of cotton crop. Given this context, this research aims to evaluate the water use efficiency of irrigated cotton crop in semiarid lands of Brazil. The study was conducted by applying the SWAP model to simulate the effect of different irrigation treatments based on deficit irrigation (DI), in the evapotranspiration (ET_c) and Yield (Y) crop. The irrigation efficiency was assessed by the Water Use Efficiency (WUE_{ET}) performance indicator based on evapotranspiration. The Soil, Water, Atmosphere and Plant (SWAP) model is a physically based, detailed agro-hydrological model that simulates vertical transport of water, solutes and heat in unsaturated/ saturated soils. The crop growth and development was simulated by the detailed module based on WOFOST. The model was calibrated with data from two experimental campaigns, in which the cotton ET_c was determined by Bowen ratio technique. Measurements of soil water content, leaf area index and biomass were also collected in such campaigns. Seven water treatments were considered. The results showed that the water increase in irrigation water supply to increases in ET_c. On the other hand, showed increases Y when subjected to treatments based on the DI to drop and if irrigation is abundant. Because of this behavior there was a significant quadratic relationship between Y and irrigation water supply. In turn, the WUE_{ET} had similar behavior to Y and also showed a significant relationship with the irrigation water supply. The treatment that showed the best performance was the T3-75%, whose irrigation accounts for 75% of the full irrigation. This treatment has WUE_{ET} equal to 0.54 kg m⁻³. The WUE_{ET} the seven experimental treatments ranged from 0.39 to 0.54 kg m⁻³.

Key words: evapotranspiration, deficit irrigation, energy balance, Bowen ratio, Richards' equation, Van Genuchten parameters.

1.0 – INTRODUÇÃO

O uso racional e eficiente da água em qualquer setor da atividade humana tem se tornado uma necessidade cada vez mais importante e relevante no nosso cotidiano, sobretudo em regiões áridas e/ou semiáridas onde esse recurso natural tem se tornado cada vez escasso.

No setor de irrigação, em particular, a racionalização do uso da água é ainda mais relevante, pois de acordo com Christofidis (2006) e Fereres e Soriano (2007) a mesma responde por aproximadamente 50% do total da produção mundial de alimentos, constituindo-se assim no maior usuário de água em escala global. Em regiões áridas e/ou semiáridas o montante de água consumida pelas culturas irrigadas ultrapassa os 70% do total de água potável disponível, com perspectivas de aumento em face do aumento vertiginoso da população mundial, e o conseqüente aumento da demanda por alimentos, e dos impactos das alterações climáticas (Fereres e Soriano, 2007; Morison et al., 2008 e Strzepek e Boehlert, 2010). Strzepek e Boehlert (2010) ainda afirmam que o aumento da população, aliado aos impactos das mudanças climáticas, coloca sobre ameaça a segurança alimentar a nível global. Assim, a necessidade de se produzir muito mais com relativamente muito menos água,

sobretudo em regiões áridas e semiáridas, onde a suplementação de água via irrigação é vital para produção agrícola, visto que as chuvas são mal distribuídas, tem se tornado uma necessidade imprescindível (Feres e Soariano, 2007; Perry et al., 2009; Strzepek e Boehlert, 2010; Morison et al., 2008). Por essa razão, o uso racional da água na irrigação tem sido um tema amplamente estudado e discutido (Kassam et al., 2007; Feres e Soriano, 2007; Steduto et al., 2007; Perry et al., 2009; Strzepek e Boehlert, 2010; Morison et al., 2008).

Além do aumento da demanda por alimentos, o crescimento populacional também impulsiona o aumento da demanda por produtos derivados das culturas industriais, a exemplo do algodão, que atualmente é uma das principais matérias-primas da indústria têxtil mundial conforme Esparza et al. (2007). O algodão foi durante todo o século XX, o principal produto agrícola do semiárido da região Nordeste do Brasil. Porém, no início da década de oitenta a cotonicultura do Nordeste do Brasil entrou em decadência, sendo praticamente dizimada nos anos subsequentes. De acordo com Bezerra et al. (2010) o declínio da atividade se deveu a incapacidade de manejo e convivência com a praga do bicudo (*Anthonomus grandis Boheman*), que se proliferou na região à época, aliado a problemas de ordem econômica e conjuntural.

O restabelecimento da cotonicultura é de fundamental importância para o desenvolvimento do semiárido do Brasil, uma vez que se trata de uma cultura de reconhecida adaptabilidade às condições edafoclimáticas da região, além de ser uma atividade agrícola de grande importância socioeconômica, pois agrega um grande contingente de mão-de-obra (Bezerra et al., 2008a; 2010).

Esse restabelecimento já é notado em algumas áreas do semiárido, pois de acordo com o MMA (2007) nos últimos anos a produção de algodoeiro herbáceo tem apresentado um expansivo aumento. Entretanto, o seu restabelecimento está condicionado a adoção de novas tecnologias ao sistema de produção, principalmente relacionados ao uso da água, uma vez que o cultivo do algodoeiro em regime de irrigação minimiza os riscos e maximiza o seu potencial produtivo. Nesse contexto, a adoção de manejo de irrigação adequado que garanta a sustentabilidade da atividade implicará em redução de custos de produção além de benefícios ambientais (Silva e Rao, 2005).

Para a adoção de práticas de manejos de irrigação que visem uma melhor eficiência de uso da água a determinação da evapotranspiração das culturas é de essencial importância. Tradicionalmente, experimentos de campo são conduzidos para quantificar e avaliar as práticas de manejo de água em sistemas de irrigação. Em geral, recomendações derivadas de um experimento de campo de um local específico não podem ser generalizadas em nível regional, com diferentes condições eco e agro-hidrológicas. Realizar experimentos para todas as condições agro-hidrológicas torna-se caro, trabalhoso e consome tempo, especialmente para que sejam representativos para uma sequência de anos (Singh et al., 2006a). Nesse contexto, os métodos de determinação da evapotranspiração real e avaliação de manejos de água a partir de dados de sensoriamento remoto, a exemplo do SEBAL/METRIC (Bastiaanssen, 2000; Allen et al., 2007a) ou a partir de simulações numéricas de modelos agro-hidrológicos, a exemplo do SWAP – Soil-Water-Atmosphere-Plant (Kroes et al., 2008), têm se tornado ferramentas bastante úteis e de uso frequente. Fazendo o uso do modelo SWAP vários estudos têm sido

conduzidos em inúmeras regiões do planeta (Dorji, 2003; Ines et al., 2006; Singh et al., 2006a, b; Vazifedoust et al., 2008; Droogers et al., 2010; Singh et al., 2010a; Jiang et al., 2010; Ma et al., 2010). A vantagem da aplicação de modelos agro-hidrológicos, a exemplo do SWAP, é que além da determinação da evapotranspiração, o mesmo simula o crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas (Singh et al., 2006a, b; Vazifedoust et al., 2008, Droogers et al., 2010). Uma vez calibrado e validado, o SWAP torna-se uma ferramenta confiável para fazer simulações da produtividade e adaptabilidade de uma determinada cultura sob diferentes combinações de manejo de irrigação (Singh et al., 2006a, b; Singh et al., 2010a).

Diante do exposto, objetiva-se com essa pesquisa, avaliar a eficiência de uso da água do algodoeiro irrigado no Semiárido brasileiro, através de simulações do modelo SWAP dos efeitos de diferentes níveis de déficit de irrigação. Para alcançar o objetivo central se fez necessário atingir alguns objetivos específicos, os quais foram: (i) determinar experimentalmente a evapotranspiração real da cultura para fins de calibração do modelo, (ii) obter semanalmente o perfil do teor de água no solo para fins de validação do modelo SWAP e (iii) calibrar e validar o modelo SWAP.

2.0 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – A cultura do algodão

A cultura do algodão (*Gossypium hirsutum* L.) possui a fibra têxtil mais importante do mundo, uma vez que representa mais de 40% da produção total mundial de fibras e é cultivada em mais de 100 países (Esparza et al., 2007). O algodoeiro afirma-se como uma cultura exigente quando se refere ao solo, uma vez que melhor se adapta aos solos de textura média, profundos, ricos em matéria orgânica, permeáveis, bem drenados e de boa fertilidade (Medeiros et al., 2008). No entanto, ainda de acordo com estes autores, o algodoeiro é uma cultura de larga adaptação às condições edáficas, podendo ser cultivada em solos de características físicas adversas e menos férteis, desde que sejam feitas as devidas correções, de forma que passem a apresentar características suficientes para atender às necessidades básicas ao seu pleno desenvolvimento.

Assim como para o solo, o algodão também é exigente quanto a questão hídrica, visto que requer altos níveis de teor de água no solo entre a floração e

a formação dos capulhos (Beltrão et al., 2008). No entanto, em alguns estudos, a exemplo de Bange e Milroy (2000), tem sido demonstrado que a cultura sob irrigação plena e abundante sofre expansão da área foliar, aumento da produção de biomassa e atraso da maturação, prolongando assim o seu ciclo vegetativo e redução do número total de capulhos. Nesse sentido, Guinn et al. (1981) atribuíram a redução de rendimento da cultura com excesso de irrigação ao aumento da concorrência ou competitividade entre as folhas e os capulhos pelos assimilados disponíveis. Assim, a cultura do algodão suporta curtos períodos de estresse hídrico, sem apresentar reduções consideráveis na produtividade (Beltrão et al., 2008) e tem se adaptado às condições edafoclimáticas do Semiárido brasileiro, suportando as irregularidades habituais na distribuição da precipitação pluvial (Bezerra et al., 2010).

Durante o século XX, a cultura do algodão representou a principal atividade agrícola do Semiárido do Brasil, chegando a ocupar uma área plantada de 3,2 milhões de hectares, representando à época aproximadamente 10% de toda a área plantada no mundo (Beltrão, 2003). Porém, no início da década de oitenta a cotonicultura entrou em crescente decadência no Nordeste do Brasil, sendo praticamente dizimada nos anos subsequentes. A decadência da atividade deveu-se principalmente aos preços subsidiados no mercado internacional e a política do Governo Federal que proibiu a exportação de plumas para garantir o abastecimento interno, mas por outro lado facilitou a importação de fibras subsidiadas do exterior. Segundo Kouri e Santos (2007), havia facilidades creditícias para importação de algodão com longos prazos de pagamento. Assim, ocorreu um barateamento acentuado do produto no

mercado interno, o que levou a um desmantelamento da cadeia produtiva da região.

Como o sistema de produção à época era baseado na agricultura familiar, dotado de baixo padrão tecnológico e de práticas agrícolas bastante rudimentares, que rendia baixa produtividade, se tornou pouco competitiva e economicamente inviável. Também contribuiu decisivamente para o declínio da atividade a incapacidade de manejo e convivência com a praga do bicudo (*Anthonomus grandis Boheman*), que se proliferou rapidamente na região à época (Bezerra et al., 2010).

Mesmo sendo dotado de baixo padrão tecnológico, o cultivo do algodoeiro no Nordeste sempre teve papel de grande relevância, tanto como cultura de reconhecida adaptabilidade às condições edafoclimáticas da região, como fator fixador de mão-de-obra, gerador de emprego, agregando grande contingente de mão-de-obra e de matéria-prima indispensável ao desenvolvimento regional e nacional (Kouri e Santos, 2007; Bezerra et al., 2010).

A retomada da cotonicultura é de fundamental importância para o desenvolvimento socioeconômico do Nordeste do Brasil. No entanto, está condicionada a adoção de novas tecnologias, principalmente relacionadas ao uso eficiente e sustentável da água, a otimização dos insumos agrícolas e o provimento de benefícios ambientais e redução dos custos de produção (Silva e Rao, 2005; Bezerra et al., 2010).

Para a adoção de um manejo adequado de irrigação e que atenda as reais necessidades hídricas da cultura, sem comprometer a sustentabilidade da

atividade, a determinação precisa da evapotranspiração da cultura – ETc e a avaliação da eficiência da irrigação se faz essencialmente necessária.

2.2 – Evapotranspiração real das culturas – ETc

A evapotranspiração ocorre quando a água é convertida da sua fase líquida para vapor de água e transferida, neste estado, para a atmosfera. O processo de evapotranspiração somente poderá ocorrer naturalmente se houver ingresso de energia no sistema, proveniente do Sol, da atmosfera, ou de ambos e, será controlado pela taxa de energia na forma de vapor de água que se propaga da superfície da Terra (Tucci e Beltrame, 2009). Ainda em concordância com estes autores esta transferência ocorre fisicamente nas formas de difusão molecular e turbulenta. O termo evapotranspiração foi proposto por Thornthwaite (1948) para designar os processos de evaporação e transpiração que ocorrem simultaneamente na natureza.

A evaporação, segundo definição de Allen et al. (1998), é o processo por meio do qual a água migra da fase líquida para a fase de vapor (vaporização), removendo-a de superfícies evaporantes como, oceanos, lagos, rios, solos e vegetação úmidas (evaporação do orvalho, da chuva interceptada pela copa das árvores e da irrigação interceptada pelo dossel das culturas); enquanto que a transpiração é a transferência de água das plantas, através de sua parte aérea (Reichardt, 1985; Taiz e Zeiger, 2004; Marengo e Lopes, 2007). Segundo Marengo e Lopes (2007) o processo de transpiração ocorre em qualquer órgão ou parte da planta exposta ao ar. Contudo, o principal órgão envolvido é a folha. Do volume total da água absorvida pela planta mais de 90% são

transferidos para atmosfera na forma de vapor de água através da transpiração.

Nas plantas, a perda de água ocorre principalmente através dos estômatos pelos quais passam mais de 90% do CO₂ sequestrado e da água transpirada, enquanto que a outra parte (<10%) pode ser perdida diretamente através da cutícula da epiderme – transpiração cuticular, ou pela periderme – a transpiração peridérmica (Marengo e Lopes, 2007). Nas plantas C₃ e C₄ a transpiração estomática diminui consideravelmente no final da tarde até valores muito baixos ou nulos à noite, quando os estômatos se fecham (Marengo e Lopes, 2007).

A transpiração foliar ou estomática depende de dois fatores principais: (1) a diferença de concentração de vapor de água entre os espaços intercelulares das folhas e a atmosfera e (2) a resistência à difusão desta rota (Taiz e Zeiger, 2004). A diferença de concentração de vapor de água é expressa como $c_{wv(folha)} - c_{wv(ar)}$. A concentração de vapor de água do ar ($c_{wv(ar)}$) pode ser prontamente medida, mas a da folha ($c_{wv(folha)}$) é mais difícil de ser determinada (Taiz e Zeigier, 2004). Ainda de acordo com estes autores, o segundo fator importante que governa a perda de água pelas folhas é a resistência à difusão na rota da transpiração, que consiste de dois componentes variáveis: a resistência estomática e a resistência da camada limítrofe.

Os estômatos, os quais estão ilustrados na Figura 2.1, são estruturas celulares que têm a função de estabelecer a comunicação do meio interno da planta com a atmosfera, constituindo um canal para as trocas de gases e a

transpiração. Segundo Reichardt (1985), os estômatos variam enormemente em número e forma nas diferentes espécies vegetais e se concentram geralmente na epiderme inferior (parte abaxial), de modo a evitar o excesso de transpiração devido a grande intensidade de luz que atinge a epiderme superior.

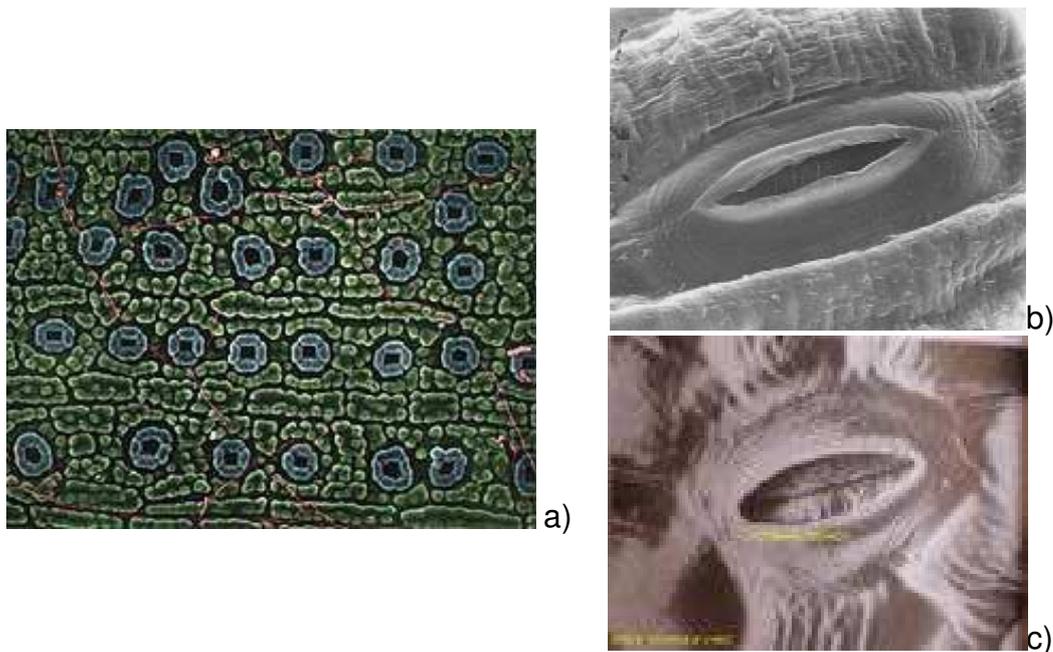


Figura 2.1: Microscopia eletrônica de varredura dos estômatos: a) distribuídos na superfície da folha (estruturas circulares), e em duas situações distintas: b) aberto, indicando a plena atividade de transpiração da planta e c) fechado, indicando condição de estresse hídrico

2.3 – Métodos de medidas e/ou estimativas da ETc

Um requisito fundamental para a adoção de práticas de manejo sustentável da irrigação, assim como a avaliação de sua eficiência através de indicadores de desempenho, a exemplo da eficiência de uso da água, é a determinação da evapotranspiração real diária (ETc) das culturas.

Medir a evapotranspiração não é fácil, pois dispositivos específicos e medições precisas de inúmeros parâmetros físicos do tempo e do solo, além de características específicas da cultura, são requeridas (Allen et al., 1998). Vários métodos para medir e/ou estimar a evapotranspiração têm sido propostos e aplicados, todos apresentando vantagens, desvantagens e limitações; porém, propiciando resultados considerados satisfatórios do ponto de vista da precisão.

Para determinação da ET_c em caráter operacional o método do coeficiente de cultura K_c é muitas vezes preferível, provavelmente pela sua relativa praticidade e simplicidade, pois requer apenas o valor do K_c , específico de cada estágio fenológico da cultura e dos dados do tempo (Hunsaker et al., 2003). Este método tem apresentado níveis de precisão que o tornam amplamente aceito.

O conceito de K_c foi introduzido por Jensen (1968), sendo posteriormente amplamente discutido e refinado pela FAO (Food and Agricultural Organization) em seu boletim FAO-56 (Irrigation and Drainage Paper, Allen et al., 1998). A abordagem da FAO-56 é baseada na combinação dos conceitos da evapotranspiração de referência – ET_0 e dos coeficientes de cultivo ou de cultura – K_c “simples” ou “dual” (Allen et al., 1998, Allen, 2000). O K_c “simples” combina os efeitos da evaporação do solo e transpiração da cultura de forma única, enquanto que a metodologia do K_c “dual” consiste na conjunção do coeficiente basal ou coeficiente de transpiração da cultura – K_{cb} e do coeficiente de evaporação do solo – K_e (Allen et al., 1998; Allen, 2000):

$$K_c = (K_{cb} + K_e) = ET_c / ET_0 \quad 2.1$$

A ET_0 representa a demanda atmosférica, enquanto que o K_c varia predominantemente com as características específicas de cada cultura, estágio de crescimento e desenvolvimento, teor de água no solo e de uma forma limitada com os elementos do tempo (Allen et al., 1998), uma vez que esses elementos que influenciam diretamente o processo de evapotranspiração geram efeitos simultâneos de redução ou intensificação tanto na evapotranspiração real como na de referência. Ainda de acordo com Allen et al. (1998), o K_c representa basicamente a taxa da ET_c presente na ET_0 e constitui uma integração dos efeitos das principais características que distinguem uma cultura de interesse das culturas de referência (grama ou alfafa); qual sejam, altura, albedo, resistência estomática e a evaporação do solo.

O boletim FAO-56 (Allen et al., 1998) lista os valores do K_c para os estágios inicial, médio e final, isto é, K_{c-ini} , K_{c-med} e K_{c-fin} , respectivamente, para inúmeras culturas. No entanto, os referidos valores listados pela FAO-56 em sua Tabela 12 são representativos para regiões de climas subúmidos que apresentam média diária da umidade relativa do ar mínima em torno de 45% e ventos calmos a moderados com médias em torno de $2,0 \text{ m s}^{-1}$. Para sua aplicação em regiões com outras condições climáticas alguns ajustes devem ser previamente feitos utilizando equações propostas na própria FAO-56 (Allen et al., 1998). A utilização desses valores de forma generalizada para regiões com climas que diferem da situação descrita na FAO-56 podem gerar incertezas na estimativa da ET_c (Hunsaker et al., 2003). Farahani et al. (2008) constataram que a aplicação dos valores do K_c listados pela FAO-56 mesmo ajustados as condições locais da região semiárida da Síria superestimou a ET_c do algodão em até 33%. Diante dessa constatação, Farahani et al. (2008)

evidenciam a importância da determinação em caráter experimental dos valores do K_c para os estágios inicial, médio e final, afim de que apresente confiabilidade suficiente para sua utilização em caráter operacional. Para determinação dos valores do K_c , a ET_c deve ser obtida com precisão confiável durante no mínimo dois anos.

Os valores do K_c para a cultura do algodão têm sido obtidos experimentalmente para diferentes regiões climáticas (Azevedo et al., 1993; Hunsaker, 1999; Farahani et al., 2008; Ko et al, 2009; Hribal, 2009; Bezerra et al., 2010).

A ET_c pode ainda ser determinada experimentalmente por meios de diferentes métodos, como as medidas lisimétricas, balanço de água no solo e os métodos micrometeorológicos. O método micrometeorológico do Balanço de Energia baseada na Razão de Bowen (BERB), em particular, tem sido amplamente usado na determinação dos fluxos verticais de vapor de água em diferentes sistemas solo-vegetação e diferentes condições climáticas (Steduto and Hsiao, 1998; Todd et al., 2000; Azevedo et al., 2003, Inmam-Bamber e McGlinchey, 2003; Silva et al., 2007; Azevedo et al., 2007; Teixeira et al., 2007; Irmak e Irmak, 2008; Zeggaf et al., 2008; Savage et al., 2009, Hou et al., 2010; Bezerra et al., 2010 e Zhang et al., 2010). Em alguns desses estudos a ET_c obtida com base no BERB foi utilizada para determinar a curva característica dos valores do K_c (Inmam-Bamber e McGlinchey, 2003; Hou et al., 2010; Bezerra et al., 2010).

O método do BERB estima a ET_c a partir do fluxo de calor latente – LE , que representa o fluxo de massa transferido da superfície para a atmosfera,

que é obtido com base na equação do balanço de energia, a qual está apresentada, segundo Rosenberg et al. (1983), por:

$$R_n + LE + H + G + S + F = 0 \quad 2.2$$

onde: R_n é o saldo de radiação, H é o fluxo de calor sensível, G fluxo de calor no solo, LE é o fluxo de calor latente, S é o calor armazenado na copa das plantas e F é a energia utilizada no processo fotossintético, todos em $W m^{-2}$.

Segundo Heilman et al. (1994), a energia utilizada no processo fotossintético – F pode ser negligenciada, pois representa menos de 2 % do saldo de radiação. Por sua vez, Borges et al. (2008) constataram que o calor armazenado no sistema planta-dossel vegetativo é irrelevante no cômputo do balanço de energia quanto comparado com os demais termos e também pode ser negligenciado. Dessa forma, a Equação 2.2 se restringe a apenas os quatro componentes R_n , H , LE e G .

A razão de Bowen (β) é computada a partir dos gradientes verticais, ou taxas de variação vertical da temperatura do ar e da pressão de vapor de água (Verma et al., 1978) que devem ser medidos em diferentes níveis acima do dossel vegetativo.

A ampla aplicação deste método é atribuída a sua relativa simplicidade, praticidade, robustez e precisão (Todd et al., 2000; Silva et al., 2007; Gavilán e Berengena, 2007), pois são requeridas apenas medições dos gradientes de temperatura do ar e de umidade, saldo de radiação e fluxo de calor no solo para estimativa da evapotranspiração real (Hou et al., 2010). No entanto, alguns autores recomendam certa cautela na aplicação dessa técnica, uma vez

que a mesma não reproduz a natureza turbulenta do processo evapotranspiração além revelar problemas em dados obtidos no período noturno e durante eventos de irrigação e/ou precipitação, uma vez que têm apresentado inconsistências físicas em cerca de 40% deles (Steduto e Hsiao, 1998; Perez et al., 1999). Também tem sido verificado que o referido método apresenta limitações quando aplicado em regiões com forte ocorrência de advecção. Nestas condições, Gavilán e Berengena (2008) constataram que o método do BERB, quando comparado com medidas lisimétricas, subestimou a ETc de gramíneas forrageiras em até 5,0% na região de Córdoba na Espanha. Já Blad e Rosenberg (1974), verificaram subestimativa da ETc da soja em relação a medidas lisimétricas da ordem de 20% no estado americano de Nebraska.

A limitação inerente ao método da razão de Bowen quanto a não reprodução da natureza turbulenta é suprida pelos métodos aerodinâmicos e de correlações turbulentas, porém o alto custo do sistema de aquisição de dados e instrumentos necessários, principalmente do método das correlações turbulentas, os tornam menos difundidos.

Assim como a razão de Bowen, o método aerodinâmico também é baseado em gradientes verticais. Enquanto que a razão de Bowen requer apenas os gradientes verticais de temperatura dos bulbos seco e úmido, o método aerodinâmico, além dos gradientes supracitados, requer ainda do gradiente vertical do vento. No entanto, o método aerodinâmico foi aplicado e comparado com o método de BERB por Pereira et al. (2003) para estimar a ETc de um pomar de citros em Piracicaba-SP, utilizando medidas de quatro

níveis e foram verificadas algumas dificuldades apresentadas pelo método aerodinâmico. Ficou constatado que o mesmo é bastante sensível à distância vertical entre os sensores, enquanto que na razão de Bowen essa sensibilidade quase inexistente, o que implicou em resultados substancialmente divergentes.

A ETc também pode ser determinada medindo os vários componentes do balanço de água no solo ou ainda medida diretamente através de lisímetros, conforme já mencionado. O método do balanço de água no solo consiste em avaliar os fluxos de entrada e de saída para a zona de raiz da cultura durante determinado período de tempo (Allen et al., 1998).

Recentemente, a evapotranspiração tem sido estimada com precisão confiável através das técnicas que utilizam dados radiométricos de sensoriamento remoto, a exemplo do algoritmo SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land (Bastiaanssen, 2000) e a sua variante METRIC – Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (Allen et al., 2007a), dentre outros. Esses métodos podem ser aplicados a dados radiométricos de qualquer sensor orbital desde que disponha de medidas nas faixas do visível e do infravermelho próximo, além da banda termal. Uma vantagem relevante da utilização de métodos baseados em dados de sensoriamento remoto é que os mesmos são capazes de estimar a ETc em escala regional, ou seja, para grandes extensões com diferentes coberturas de solo (culturas agrícolas, florestas, solo exposto etc.) sem a necessidade de informações mais detalhadas da superfície.

O desempenho do SEBAL e/ou METRIC têm sido testado em diferentes ecossistemas e regiões do planeta a exemplo do Sri Lanka (Bastiaanssen et

al., 2005), Estados Unidos (Tasumi et al., 2005; Allen et al., 2007a, b; Singh et al., 2008; Wang et al., 2009), Sudão (Bashir et al., 2008), Brasil (Bezerra et al., 2008b; Teixeira et al., 2009a, b; Folhes et al., 2009) e China (Kimura et al., 2007; Li et al., 2008), dentre outros. Em todos esses estudos o SEBAL/METRIC tem alcançado desempenho satisfatório, apresentando diferenças, quando comparado com observações de campo, dentro da faixa das imprecisões instrumentais (Bastiaanssen, 2000), lhes conferindo assim, robustez e confiabilidade suficientes para serem aplicados na estimativa da ETc. No entanto, uma limitação relevante para aplicação do SEBAL/METRIC é a disponibilidade de imagens, que necessariamente devem estar livres da presença de nuvens.

A ETc das culturas também tem sido obtida através de simulações numéricas de modelos agrohidrológicos, a exemplo do SWAP – Soil-Water-Atmosphere-Plant (Kroes e Van Dam, 2003; Kroes et al., 2008). A utilização do SWAP, em particular, tem se tornado importante principalmente em estudos envolvendo culturas irrigadas, pois permite, depois de calibrado e validado, simular o efeito no consumo hídrico e na produtividade das culturas combinando diferentes opções de manejo de água como diferentes lâminas de irrigação e diferentes turno de rega.

2.4 – O Modelo SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) – Teoria

Feddes (1971) e Feddes et al. (1978) desenvolveram o modelo SWATR (Soil-Water-Actual-Transpiration-Rate). Este modelo foi sucessivamente refinado por Belmans et al. (1983), Wesseling et al. (1991), Van der Broek et al. (1994) e Van Dam (1997) sendo renomeado de SWAP (Soil-Water-

Atmosphere-Plant) (Kroes e Van Dam, 2003). A versão atual do modelo SWAP está detalhadamente discriminada em Kroes et al. (2008).

O modelo SWAP simula os transportes de água, solutos e calor na zona não saturada e o crescimento e desenvolvimento de cultura no ambiente solo-planta-atmosfera em escala de campo. O modelo oferece uma ampla gama de possibilidades para abordar questões práticas no domínio da agricultura, gestão de água e proteção ambiental (Qureshi et al., 2010). Este modelo tem sido aplicado com sucesso em muitos estudos hidrológicos para uma variedade de condições climáticas e agrícolas (Sarwar et al., 2000; Sarwar e Feddes, 2000; Singh et al., 2006a, b; Vazifedoust et al., 2008; Droogers et al., 2010; Qureshi et al., 2010; Singh et al., 2010a; Jiang et al., 2010; Ma et al., 2010). Existem opções para fins de irrigação, projeto de drenagem, previsão de profundidade de lençol freático, salinidade do solo e lixiviação de nitrogênio e de pesticidas (Qureshi et al., 2010).

O SWAP requer vários dados de entrada os quais podem ser divididos em variáveis de estado, condições de contorno (forçantes do modelo) e dados de validação e/ou calibração. Os mais importantes dados de entrada são os relacionados ao solo e as características específicas da cultura a ser estudada (Droogers et al., 2010).

A ampla gama de condições de contorno inferior e superior que são oferecidos no modelo SWAP é uma das principais vantagens para aplicação do modelo. As condições de contorno superior do sistema são descritas pela taxa de evapotranspiração potencial, ET_{pot} , a irrigação e a precipitação (Kroes et al., 2008; Vazifedoust et al., 2008; Qureshi et al., 2010). Na parte inferior do

sistema, as condições de contorno podem ser descritas com várias opções. Estas incluem o nível das águas subterrâneas em função do tempo, o fluxo de ou para aquíferos semi-confinados, o fluxo de ou para a superfície de drenagem livre, numa relação exponencial entre o fluxo de águas subterrâneas profundas ou de fluxo zero, drenagem livre e saída livres (Van Dam et al., 1997). A ET_{pot} é repartida em transpiração potencial (T_{pot}), que é componente da cultura, e taxa de evaporação potencial do solo (E_{pot}), baseado tanto no índice de área foliar (IAF) na fração de cobertura do solo, ambos em função do estágio de desenvolvimento da cultura (Qureshi et al., 2010).

A base fundamental do modelo é a modelagem do fluxo vertical de água na zona saturada e/ou insaturada, cuja metodologia de cálculo é baseada na Equação de Richards, que é uma combinação da Equação de Darcy com a equação da continuidade (Kroes et al., 2008).

2.4.1 – A Equação de Darcy

A Equação de Darcy foi formulada pelo físico francês Henry Darcy através de um arranjo experimental sobre infiltração vertical de água em filtros (colunas) de areia homogênea sob condições de saturação (Libardi, 2005). Darcy foi o primeiro a estabelecer uma equação que possibilitasse a quantificação do movimento de água em materiais porosos, a exemplo do solo, em condições de saturação, qual seja:

$$q = -K_{sat} \cdot \nabla \mathcal{H} = -K_{sat} \cdot grad \mathcal{H} \quad 2.3$$

em que: q é a densidade de fluxo de água no solo ($cm \ d^{-1}$), K_{sat} é a condutividade hidráulica em condições de saturação ($cm \ d^{-1}$) e \mathcal{H} é o potencial hidráulico (cm).

Reichardt e Timm (2004) definem o potencial hidráulico \mathcal{H} como sendo o potencial total de água no solo Ψ , sem a inclusão da componente osmótica, Ψ_{os} , ou seja:

$$\mathcal{H} = \Psi - \Psi_{os} = \Psi_p + \Psi_m + \Psi_g \quad 2.4$$

onde: Ψ_p é a componente potencial de pressão, Ψ_m é a componente potencial matricial e Ψ_g é a componente potencial gravitacional.

Ainda de acordo com Reichardt e Timm (2004), como ambos Ψ_p e Ψ_m se referem a pressões, o primeiro às positivas e o segundo às negativas, podem ser agrupados em uma única componente, $h = \Psi_p + \Psi_m$, que cobre toda a faixa de pressões. Já a componente gravitacional Ψ_g pode ser expressa em termos da coordenada vertical de posição e, se a superfície do solo for tomada como referência, ela se identifica com a profundidade no solo z . Assim, a forma mais comum de apresentar o potencial de água no solo na literatura (Guerra, 2004; Reichardt e Timm, 2004; Hillel, 2004; Libardi, 2005) é:

$$\mathcal{H} = h + z \quad 2.5$$

Dessa forma, a Equação de Darcy para solos saturados na sua forma completa é dada por:

$$\vec{q} = -K_{sat} \cdot \vec{\nabla} \mathcal{H} = -K_{sat} \left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \right) (h + z) \quad 2.6$$

Conforme já comentado, a equação anterior é válida apenas para quantificar fluxo de água em meio saturado ou, conforme Libardi (2005), para quantificar movimento de um líquido que satura um meio poroso. Porém, a

condição mais comum no estudo do movimento da água no solo é a condição de não saturação. De acordo com Libardi (2005), Buckingham foi considerado o primeiro a apresentar uma equação capaz de quantificar o movimento da água em condições de solo não saturado, quando introduziu as funções $\phi_m = \phi_m(\theta)$ e $K = K(\theta)$, que na ocasião as chamou de “potencial capilar” e “condutividade hidráulica”, respectivamente. Entretanto, coube a Richards (1928) definir um potencial total como sendo igual à soma do potencial capilar de 8 e o potencial gravitacional e finalmente definir a Equação de Darcy ou a Equação de Darcy-Buckingham, como é referida por alguns autores (Prevedello, 1996; Guerra, 2004; Libardi, 2005) para o fluxo de água em solos não saturados:

$$\vec{q} = -K(\theta) \left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \right) (h + z) \quad 2.7$$

onde: $K(\theta)$ é a função da condutividade hidráulica e θ é o teor de água no solo.

As simulações do modelo SWAP são unidimensionais, ou seja, para a direção vertical (Van Dam et al., 2006; Kroes et al., 2008). Dessa forma, as coordenadas \hat{i} e \hat{j} da Equação 2.7 são negligenciadas e a Equação de Darcy utilizada pelo SWAP resume-se a:

$$q = -K(\theta) \left(\frac{\partial(h + z)}{\partial z} \right) \Rightarrow q = -K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad 2.8$$

2.4.2 – A Equação de Richards

A Equação de Richards é o resultado da combinação da Equação de Darcy com a Equação da Continuidade, a qual é apresentada na sequência:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad 2.9$$

Substituindo a Equação 2.8 na Equação 2.9, obtém-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left(K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right)}{\partial z} \quad 2.10$$

A equação de Richard é resolvida pelo SWAP através de um implícito esquema de diferença finita, o qual está detalhadamente descrito em Van Dam et al. (2008). A equação tem uma clara base física em uma escala onde o solo pode ser considerado como uma continuidade de solo, ar e água. O SWAP resolve a equação Richards numericamente para ambas as condições de saturação e não saturação, sujeitas as especificações iniciais das condições de contorno e o conhecimento das relações entre o teor de água no solo – θ , pressão matricial de água no solo – h e a condutividade hidráulica do solo não saturado – K . Estas relações, que normalmente são chamadas de funções hidráulicas do solo, descrevem a capacidade do solo para retenção, liberação e transmissão da água sob diferentes condições ambientais e de contorno e podem ser medidas diretamente no campo, determinada em laboratório a partir de dados do solo coletados em campo.

Embora valores tabelados de $\theta(h)$ e $K(\theta)$ tenham sido usados por muitos anos, atualmente expressões analíticas são geralmente utilizadas em aplicações do modelo SWAP (Dorij, 2003; Singh et al., 2006a, b; Ines et al., 2006; Vazifedoust et al., 2008; Daas et al., 2008; Mandare et al., 2008). As funções de Van Genuchten-Mualem (VGM) (Van Genuchten, 1980) têm sido

usadas em inúmeros estudos e também têm sido implementadas no modelo SWAP (Kroes et al., 2008).

$$\theta(h) = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad 2.11$$

$$K(\theta) = K_{sat} S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{n/n-1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]^2 \quad 2.12$$

onde θ_{res} é o teor de água residual no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{sat} é o teor de água no solo na condição de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $S_e = (\theta - \theta_{res}) / (\theta_{sat} - \theta_{res})$ é a saturação relativa (-), α e n são fatores empíricos (cm^{-1}) e (-), respectivamente, $m = 1 - 1/n$, K_{sat} é a condutividade hidráulica do solo saturado (cm dia^{-1}) e λ é um fator de tortuosidade, que pode ter seu valor fixado em 0,5 (Ramano e Santini, 1999). No entanto, esse parâmetro tem apresentado grande variabilidade entre diferentes tipos de solos e no mesmo solo em diferentes profundidades (Vazifedoust et al., 2008).

Os parâmetros hidráulicos do solo normalmente são determinados em campo ou a partir da curva de retenção de água no solo determinadas em laboratório a partir de amostras do solo coletadas no campo (Utset et al., 2006; Anuraga et al., 2006; Mandare et al., 2008; Vazifedoust et al., 2008; Scorza Júnior et al., 2010). Porém, em alguns estudos tem sido usada a técnica da modelagem inversa (inversing modeling) utilizando o PEST (Doherty, 2005) para estimar os referidos parâmetros (Romano e Santini, 1999; Jhorar et al., 2002; Ines e Droogers, 2002; Singh et al., 2010a; Droogers et al., 2010). O PEST é um programa de estimativa não linear de parâmetros e pode ser usado para ajustar parâmetros de praticamente qualquer modelo computacional

existente (Doherty, 2005). O PEST executa um modelo quantas vezes forem necessárias para ajustar seus parâmetros, até as saídas do modelo selecionados correspondam a um conjunto complementar de medidas de campo ou de laboratório (Droogers et al., 2010). A otimização desses parâmetros é feita utilizando o algoritmo Gauss-Marquardt-Levenberg (GML).

Entretanto, de acordo com Singh et al. (2010a), a definição dos parâmetros hidráulicos do solo em condições de campo deve ser sempre levada em consideração. Porém, ainda de acordo com Singh et al. (2010a), a determinação precisa das propriedades hidráulicas do solo não saturado in situ muitas vezes não é viável devido à grande variabilidade natural dos solos e as limitações instrumentais que tornam as medições e análises demoradas e dispendiosas. Devido a esses problemas, é que os referidos parâmetros são frequentemente determinados em laboratório ou estimados indiretamente de outras propriedades do solo, que podem ser medidas com maior facilidade e precisão. A medição direta em laboratório, utilizando amostras do solo coletadas em campo, é a forma clássica para determinar as funções hidráulicas (Van Genuchten et al., 1991). Infelizmente, a medida direta dessas funções é impraticável para a maioria das aplicações em pesquisa e gestão, especialmente para estudos de grande escala.

No modelo SWAP ainda foi implantada uma modificação das funções de VGM descrita em Schaap e Van Genuchten (2006) que de acordo com Kroes et al. (2008) se baseia na introdução de uma pequena altura capilar mínima h_e , que causa uma pequena mudança na curva de retenção (Vogel et al., 2001). A

definição do conteúdo relativo de água, S_e , foi baseada em Ippisch et al. (2006).

2.4.3 – Módulos de simulações do crescimento vegetativo

O modelo SWAP é um modelo hidrológico que simula os fluxos verticais de água, soluto e calor na zona não saturada em interação com o crescimento e desenvolvimento das culturas. Para simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas o SWAP é dotado de três rotinas, sendo um módulo simples baseado em Doorenbos e Kassam (1979), um módulo detalhado para todo o tipo de culturas baseado no WOFOST (*WO* *RLD* *FO* *OD* *ST* *UD* *IES*), e um módulo pormenorizado para gramíneas (Kroes et al., 2008).

O módulo simples descreve o desenvolvimento das culturas, independente dos fatores externos, visto que as suas simulações são feitas sem qualquer interação entre o crescimento da cultura e as condições de estresse hídrico e/ou salino (Singh et al., 2006a). Sua principal função é estabelecer a condição de contorno superior adequada a circulação da água no solo. O módulo simples é útil quando a simulação do crescimento das culturas não é necessária, ou quando os dados de entrada necessários para fazer essas simulações são insuficientes (Kroes et al., 2008).

O módulo detalhado para todo tipo de cultura baseado WOFOST (Spitters et al., 1989; Supit et al., 1994; Wolf, 2003) permite simulações da dinâmica envolvida no crescimento e desenvolvimento da cultura desde a emergência até a maturidade com base nas propriedades genéticas e nas condições ambientais (Eitzinger et al., 2004). Ao contrário do módulo simples, o

módulo detalhado baseado no WOFOST leva em consideração a interação entre o crescimento real das culturas e o estresse hídrico e/ou salino (Singh et al., 2006a; Kroes et al., 2008). Além do estresse hídrico e do estresse salino a deficiência nutricional, as ervas daninhas, as pragas e as doenças são fatores que podem afetar a produção agrícola em condições real de campo. Porém, os referidos efeitos não são implementados na presente combinação do SWAP-WOFOST (Kroes e Van Dam, 2003; Kroes et al., 2008).

Segundo Vazifedoust et al. (2008) a vantagem do módulo detalhado baseado no WOFOST é que o mesmo é capaz de simular o crescimento real e potencial da matéria seca e da produtividade da cultura. A taxa de crescimento da matéria seca ($\text{kg de matéria seca ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) é simulada através do cômputo da assimilação potencial bruta de dióxido de carbono ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) de uma cultura sob condições ótimas baseadas na radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel da cultura e nas características fotossintéticas das folhas (Vazifedoust et al., 2008; Kroes et al., 2008).

O WOFOST (Spitters et al., 1989; Supit et al., 1994) simula o crescimento das culturas a partir da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) absorvida pelo dossel da cultura, cujo cálculo é baseado nas características fotossintéticas das folhas.

Já o módulo pormenorizado para gramíneas é uma versão modificada do WOFOST usado apenas em simulações de espécies de pastagens

supostamente perenes com características semelhantes ao azevém¹ (*Lolium perenne* L.)

2.4.4 – Aplicações do modelo SWAP no mundo

A aplicação do modelo SWAP em conjunto com os módulos de simulação do crescimento e do desenvolvimento das culturas, tanto o detalhado baseado no WOFOST quanto o simples baseado em Doorenbos e Kassam (1978), tem se tornado uma importante ferramenta no planejamento e elaboração de alternativas e estratégias de manejo de irrigação com avaliações prévias de seu desempenho. Nessa linha, Mandare et al. (2008) simularam o efeito de diferentes manejos de irrigação com o intuito de encontrar a melhor opção que gerasse incremento no rendimento da cultura do trigo na Índia, garantindo assim a sustentabilidade da atividade. Vazifedoust et al. (2008) avaliaram estratégias de manejo culturais e de irrigação sob condições de disponibilidades hídricas limitadas no distrito irrigado de Borkhar no Iran, tendo em vista o incremento da eficiência de uso da água e da produtividade das culturas do trigo, milho forrageiro, girassol e beterraba. Singh et al. (2006a, b) também aplicaram o SWAP para avaliar o desempenho do manejo de irrigação adotado no distrito irrigado de Sirsa na Índia no ano agrícola de 2001-2002 fazendo o uso de indicadores de desempenho da irrigação, do balanço salino e do saldo de recarga das águas subterrâneas. No referido estudo foram simulados diferentes cenários combinando diferentes opções de manejo de irrigação, objetivando incrementar em até 20% a produtividade da cultura e reduzir perdas de água no escoamento. Dorji (2003), por sua vez, avaliou se os

¹ Planta originária da Europa e da Ásia, da família das gramíneas (*Lolium perenne* L.), de folhas lineares e espiguetas míticas em espigas eretas. Fornece excelente forragem para o gado, é usada para relvados de jardins, para fixar terras contra a erosão, e no fabrico de papel, e o suco é coagulante do leite. [Sin.: erva-castelhana, joio-castelhano, relva.].

respectivos manejos de irrigação adotados na região de Alentejo, Portugal, nos cultivos de algodão, milho, trigo, uva, oliva, girassol e arroz, estavam atendendo as reais necessidades hídricas das referidas culturas. Ainda, no supracitado estudo foram simuladas as repostas das citadas culturas aos efeitos de diferentes combinações de lâminas de irrigação e turnos de rega. Crescimanno e Garofalo (2006) simularam diferentes cenários de manejo de irrigação com água com elevada teor de salinidade visando otimizar a irrigação em um vinhedo em solo argiloso na Sicília, Itália. Singh et al. (2010b) utilizaram o SWAP para analisar todos os componentes do balanço hídrico, a fim de otimizar o uso da água na produção agrícola na província de Gansu, noroeste da China, enquanto que Droogers et al. (2010) avaliaram a lâmina de irrigação aplicada no distrito irrigado de Genil-Cobra localizado nas proximidade da cidade espanhola de Córdoba. Qureshi et al. (2010) aplicaram o SWAP para determinar a profundidade ideal das águas subterrâneas e as necessidades de irrigação para maximização da produção de algodão nas áreas irrigadas de Akaltyn da província Syrdarya do Uzbequistão.

O SWAP também tem sido aplicado para simular o efeito de diferentes eventos ambientais, naturais ou antrópicos, no crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas. Mandare et al. (2008) aplicaram o modelo SWAP para simular o impacto causado pelo uso conjunto das águas subterrâneas e de canais advindas de represas no crescimento e desenvolvimento da cultura do trigo e o efeito do uso continuado de água com alta salinidade no acúmulo de sal no perfil do solo. Os efeitos de salinidade da água também foram avaliados através do SWAP por Ben-Asher et al. (2006) em vinhedos em Israel, enquanto que Tedeschi e Menenti (2002) avaliaram a quantidade de sal acumulado no

solo de áreas irrigadas, devido ao uso continuado de água com elevada salinidade. Por sua vez, Utset et al. (2006) simularam os impactos causados por eventos climáticos extremos (anos secos e chuvosos) no uso da água para irrigação no Mediterrâneo, enquanto que Droogers et al. (2008) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na agricultura irrigada através de simulações de cenários de mudanças climáticas globais. Louzada et al. (2008) avaliaram as condições de drenagem de solos de várzeas compactadas devido ao trânsito de máquinas agrícolas em áreas de cultivo de arroz no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Também no Brasil, recentemente, Scorza Júnior et al. (2010) utilizaram o modelo para descrever os perfis de umidade em um Latossolo muito argilosa, em Dourados, no estado de Mato Grosso do Sul.

O modelo SWAP também tem sido aplicado de forma integrada com dados de sensoriamento remoto e com ferramenta de Sistema de Informação Geográfica (GIS, sigla do termo em inglês – Geography Information System). Vazifedoust et al. (2009) investigaram se a assimilação de dados de IAF e/ou da evapotranspiração relativa, ET_c/ET_p^{-1} , obtidos a partir de dados sensoriamento remoto de baixa ou moderada resolução do sensor MODIS poderiam ser usados em combinação com um modelo agrohyrological SWAP para prever a produção total de trigo com meses de antecedência. No referido estudo concluíram que as previsões da produção de trigo para um mês de antecedência através da simulação em escala regional foram muito promissores no que diz respeito aos dados estatísticos. Daas et al. (2008) aplicaram o SWAP para simular o teor de água no solo na zona radicular combinando com imagens do índice de área foliar de alta resolução obtida por sensores a bordo de plataformas tripuladas. Minacapilli et al. (2009)

implementaram no SWAP dados de albedo e índice de área foliar obtidos com sensores de alta resolução (3 m x 3 m) a bordo plataformas tripuladas para estimar a ETc de cultura perenes em escala regional na região da Sicília na Itália.

2.5 – Desempenho do modelo SWAP

O modelo SWAP tem sido calibrado, validado e aplicado em diversas regiões do planeta, apresentando precisão bastante satisfatória. Ines e Mohanty (2008) observaram que as simulações da umidade de solo com o SWAP em diferentes níveis e as observações de campanhas experimentais nos Estados Unidos apresentaram fortes correlações. Na comparação com os dados oriundos da campanha experimental SGP97 (Southern Great Plains 1997) no estado de Oklahoma, as simulações com o SWAP da umidade do solo próxima a superfície (profundidade z de 0 a 5 cm) foram bem correlacionadas com as observações de campo apresentando r (coeficiente de correlação de Pearson) igual a 0,90 e MBE (Erro Médio Quadrático) de $-0,002 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Quando compararam com perfis observados de 0 a 60 cm, ainda com dados oriundos da referida campanha experimental, dependendo das condições iniciais de contorno, o r variou de 0,94 a 0,97. Na comparação com dados observados em quatro pontos do SMACEX02 (Soil Moisture Experiment 2002) em Iowa, as simulações do SWAP também apresentaram fortes correlações com r de 0,75, 0,88, 0,95 e 0,98. Em todas as citadas campanhas experimentais, as observações da umidade do solo foram feitas com TDR (Time Domain Reflectometry).

Vazifedoust et al. (2008) fizeram comparações das simulações da umidade de solo feitas pelo SWAP com observações de campo através do método gravimétrico em campos de trigo, milho, girassol e beterraba durante o ano agrícola 2004-2005 e obtiveram RMSE (Raiz do Erro Médio Quadrático) na faixa de 0,020 a 0,052 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Valores dessa magnitude também foram obtidos por Mandare et al. (2008) quando compararam os resultados do SWAP de campos de trigo e arroz com observações de campo feitas através do método gravimétrico.

2.6 – Eficiência do uso da água na irrigação

O contínuo crescimento da população humana tem gerado e vai continuar gerando uma demanda cada vez maior por alimentos. Por outro lado, a escassez de água potável nas regiões áridas e/ou semiáridas é cada vez crescente e o seu uso de forma eficiente vem se tornando cada vez mais necessário. De acordo com Perry et al. (2009) a competição por recursos hídricos já é bastante evidente – desde as bacias de Murray Darling na Austrália aos rios do Oriente Médio, África e América do Sul, aos aquíferos do norte da Índia, do Maghreb na África e do Ogallala na região central dos Estados Unidos. A causa de grande parte da escassez de água potável, sobretudo em regiões áridas e semiáridas é a exploração predatória dos recursos naturais e a ausência quase que total de políticas públicas eficazes de gestão dos recursos hídricos, principalmente em países em desenvolvimento. Quando a utilização da água não é regulamentada ou controlada, o desequilíbrio entre a oferta e a demanda é evidente, e como consequência ocorre rebaixamento do nível das águas subterrâneas e a devastação dos ecossistemas aquáticos é inevitável. Assim, o uso racional da água em

qualquer que seja a atividade humana quer seja doméstica, industrial ou agrícola, tem se tornado uma necessidade imperiosa.

A racionalização do uso da água na irrigação tem relevância significativa nesse contexto, pois de acordo com Christofidis (2006) e Fereres e Soriano (2007) a mesma responde por aproximadamente 50% do total da produção mundial de alimentos. Outra preocupação com o uso eficiente da água na irrigação é que seja garantida a sua sustentabilidade, visto que nos países em desenvolvimento a agricultura continua sendo um setor econômico estrategicamente importante, pois contribui significativamente para a renda nacional e o crescimento econômico além de proporcionar meios de sobrevivência para uma parcela considerável da população (Hussain et al., 2007). Outro fato bastante relevante é que a agricultura irrigada é o principal usuário de água a nível mundial, atingido uma proporção que excede os 80% do total disponível em zonas áridas e semiáridas (Fereres e Soriano, 2007; Morison et al., 2008; Perry et al., 2009; Strzepek e Boehlert, 2010). Outro fato preocupante é que como o aumento da população, aliado aos impactos das mudanças climáticas globais, coloca sobre ameaça a segurança alimentar a nível global (Strzepek e Boehlert, 2010). Ainda de acordo com os citados autores esta ameaça advém do aumento da demanda na mesma proporção de outros setores como o consumo doméstico e a demanda industrial.

Quando a disponibilidade de água para a produção agrícola é limitada, a meta do produtor deve ser o de maximizar o lucro líquido por unidade de água utilizada ou aplicada, e não por unidade de área plantada (Fereres e Soriano, 2007). Nesse contexto, produzir com a menor quantidade de água possível tem se tornado um desafio para o setor de irrigação (Kassam et al., 2007). A

Eficiência de Uso da Água (EUA) que também é referida na literatura como Produtividade de Água, é um indicador de desempenho da irrigação que reflete este desafio expondo a relação entre os benefícios líquidos da agricultura, silvicultura, pesca e/ou pecuária e o montante de água consumida para produzir esses benefícios (Molden, 1997; Steduto et al., 2007; Kassam et al., 2007). Esse indicador tem sido amplamente utilizado em estudos com diversas culturas em várias regiões no mundo (Singh et al., 2006a, b; Karan et al., 2006; Govindarajan et al., 2008; Teixeira et al., 2009a, b; Hellegers et al., 2009). O desempenho da irrigação do algodoeiro tem sido intensamente estudado em inúmeras regiões do planeta potencialmente produtoras dessa oleaginosa (Saranga et al., 1998, Anaç et al., 1999; Yazar et al., 2002; Tennakoon e Milroy, 2003; Dağdelen et al., 2006; 2009; Karam et al., 2006; Ünlü et al., 2007; Ibragimov et al., 2007; Katerji et al., 2008; Du et al., 2008; Bezerra et al., 2008a; Pereira et al., 2009; Singh et al., 2010b; Tang et al., 2010).

Em todos os estudos supracitados o objetivo central foi encontrar um manejo de irrigação que pudesse garantir incremento no valor da EUA. Algumas das estratégias que têm sido amplamente utilizadas no manejo de irrigação com o intuito de melhorar o seu desempenho, isto é, propiciar incremento no valor da EUA, é a adoção das técnicas da irrigação parcial da zona de raiz (PRI, sigla do termo em inglês Partial Rootzone Irrigation) e do déficit de irrigação (DI). O uso de sistemas de irrigação mais eficientes, como os de microrrigação, também constitui meios estratégicos para melhorar a eficiência de uso da água.

O PRI é uma prática de irrigação no qual o manejo da irrigação permite o molhamento parcial do sistema radicular, enquanto o restante é exposto a

secagem do solo (Mavi e Tupper, 2004; Kudoyarova et al., 2007; Tang et al., 2010). As partes secas e úmidas do solo são irrigadas alternadamente pela mudança periódica do turno de rega de acordo com a taxa de secagem do solo e do consumo de água das culturas (Kang e Zhang, 2004). De acordo com Morison et al. (2008) muitos dos benefícios do PRI podem ser atribuídos à maior absorção de água pela planta do perfil mais profundo do solo aumentando assim, a água disponível e como consequência há uma considerável melhora do rendimento da cultura.

O DI, por sua vez, consiste na aplicação de água em uma quantidade abaixo da demanda máxima da cultura (DaCosta e Huang, 2006; Fereres e Soriano, 2007; Pereira et al., 2009). Tem sido demonstrado experimentalmente que a adoção da prática do DI se traduz em incremento na EUA (Zwart e Bastiaanssen, 2004; Fan et al, 2005; DaCosta e Huang, 2006; Pereira et al., 2009). Além da melhora da eficiência da irrigação, a redução dos custos e os benefícios ambientais constituem virtudes potenciais da prática do DI (English e Raja, 2006). De acordo com Baumhardt et al. (2009) o DI tem se tornado uma ferramenta importante na manutenção da produção de algodão em zonas áridas dos Estados Unidos em face do declínio dos recursos hídricos nas referidas áreas.

O DI tem sido aplicado predominantemente durante todo o ciclo fenológico da cultura. Porém, em alguns estudos o DI foi aplicado apenas em determinado período da fase de crescimento e desenvolvimento da cultura (Mavi e Tupper, 2004). Duas estratégias baseadas em dois níveis de DI para a cultura do milho foram avaliados por Boldt et al. (1999), em Nebraska. A primeira estratégia constou da aplicação do DI no período que se prolongou

desde quando a cultura acumulou 560 graus-dia de crescimento e terminou quando o GDD alcançou 1220 graus-dia acumulados. Em média, este período correspondeu a cinco semanas. Na segunda estratégia, o período de aplicação do DI começou quando a cultura tinha acumulado 720 GDD e terminou quando o mesmo alcançou os 1110 graus-dia acumulados, o que equivaleu a um período de 3,5 semanas. A temporada de cinco semanas com o DI resultou em uma pequena redução da produtividade, porém, a irrigação aplicada foi reduzida em 19% em comparação com irrigação total. A limitação do período de irrigação em 3,5 semanas diminuiu a lâmina aplicada, mas teve um impacto mais significativo sobre o rendimento de grãos. A produção foi reduzida em aproximadamente 15% em relação ao rendimento máximo. O montante de água aplicada, por sua vez, diminuiu em torno de 39%.

Há várias razões para a busca do incremento da EUA a partir da adoção da prática do DI. A Figura 2.2 apresenta a relação geral entre a produtividade e a irrigação para uma cultura anual. Pequenos acréscimos na lâmina de irrigação se traduzem em incrementos nos valores da ETc de modo que a relação entre a lâmina de irrigação, a ETc e a produtividade da cultura é mais ou menos linear. Porém, essa relação linear acontece até um determinado ponto onde a relação entre a irrigação aplicada e a produtividade torna-se curva. Essa mudança de comportamento acontece porque o excesso de água que fora aplicada não é utilizada pela planta e conseqüentemente convertida em ETc e então é perdida para a atmosfera ou por percolação profunda (Fereres e Soriano, 2007). Neste caso a ETc é considerada literalmente uma perda, visto que se trata de um volume de água que não propiciou nenhum benefício à planta (Perry et al., 2009).

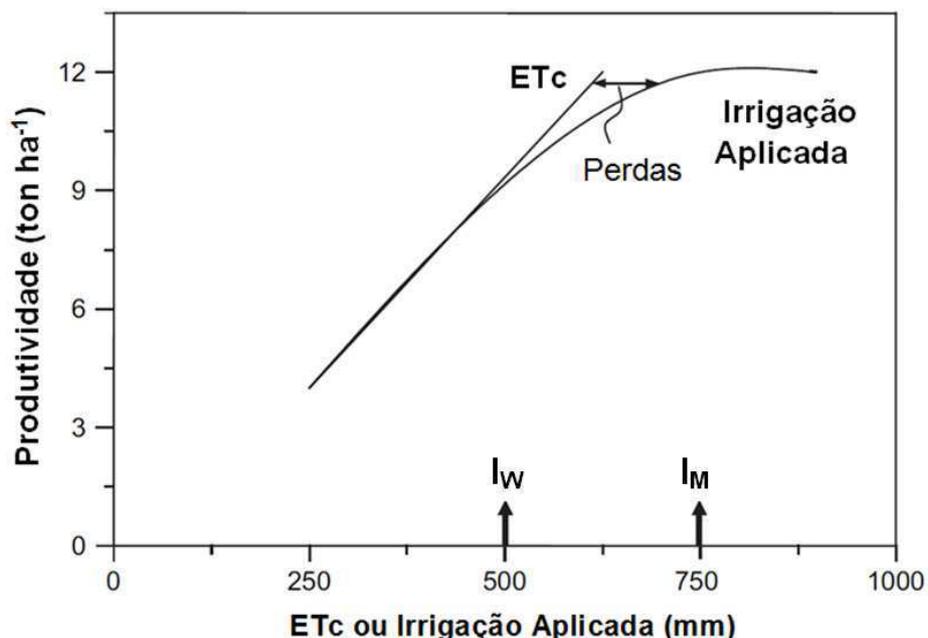


Figura 2.2: Comportamento geral da relação entre a irrigação aplicada, ETc e o rendimento da cultura. I_W indica o ponto além do qual a EUA da irrigação começa a diminuir, e I_M indica o ponto além do qual o rendimento não aumenta mesmo com a aplicação adicional de água (Fonte: Fereres e Soriano, 2007)

No ponto I_M (Figura 2.2) a produtividade da cultura atinge seu valor máximo e os montantes adicionais de irrigação não se convertem em incremento da produtividade. A localização desse ponto não é facilmente definida e, portanto, quando a água não é limitada ou é barata, a irrigação é aplicada em excesso para evitar o risco de perda de produtividade. A quantidade de água necessária para assegurar rendimento máximo depende da uniformidade da irrigação (Fereres e Soriano, 2007) e sua adequação pode variar de acordo com as características específicas de cada cultura (Baumhardt et al., 2009).

3.0 – MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Área de estudo

A área estudada compreende a Chapada do Apodi que está localizada na divisa entre os estados do Rio Grande do Norte (RN) e Ceará (CE) no Nordeste do Brasil, e funciona como divisora de águas das bacias hidrográficas Apodi-Mossoró no RN e Jaguaribe no CE. No estado do Ceará está distribuída por cinco municípios: Alto Santo, Tabuleiro do Norte, Limoeiro do Norte, Quixeré e Jaguaruana. No RN em quatro: Baraúna, Governador Dix-Sept Rosado, Felipe Guerra e Apodi. Todos esses municípios são plenamente aptos para o cultivo do algodão (Beltrão et al., 2008). A Chapada do Apodi ocupa lugar de destaque na produção agrícola irrigada do Nordeste do Brasil, sobretudo de fruticultura tropical para exportação. Sobre sua extensão territorial está localizado o Distrito Irrigado Jaguaribe-Apodi (DIJA), além de áreas de produção da Del Monte Fresh do Brasil, Fazenda Frutacor Ltda e inúmeros pequenos produtores e assentamentos rurais.

A campanha experimental foi realizada na estação experimental da EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio Grande do Norte, no município de Apodi-RN ($5^{\circ}37'37''\text{S}$; $37^{\circ}49'54''\text{W}$; 138 m), no estado do Rio Grande do Norte. A localização da área estudada em relação ao Brasil, além da topografia da região está apresentada na Figura 3.1.

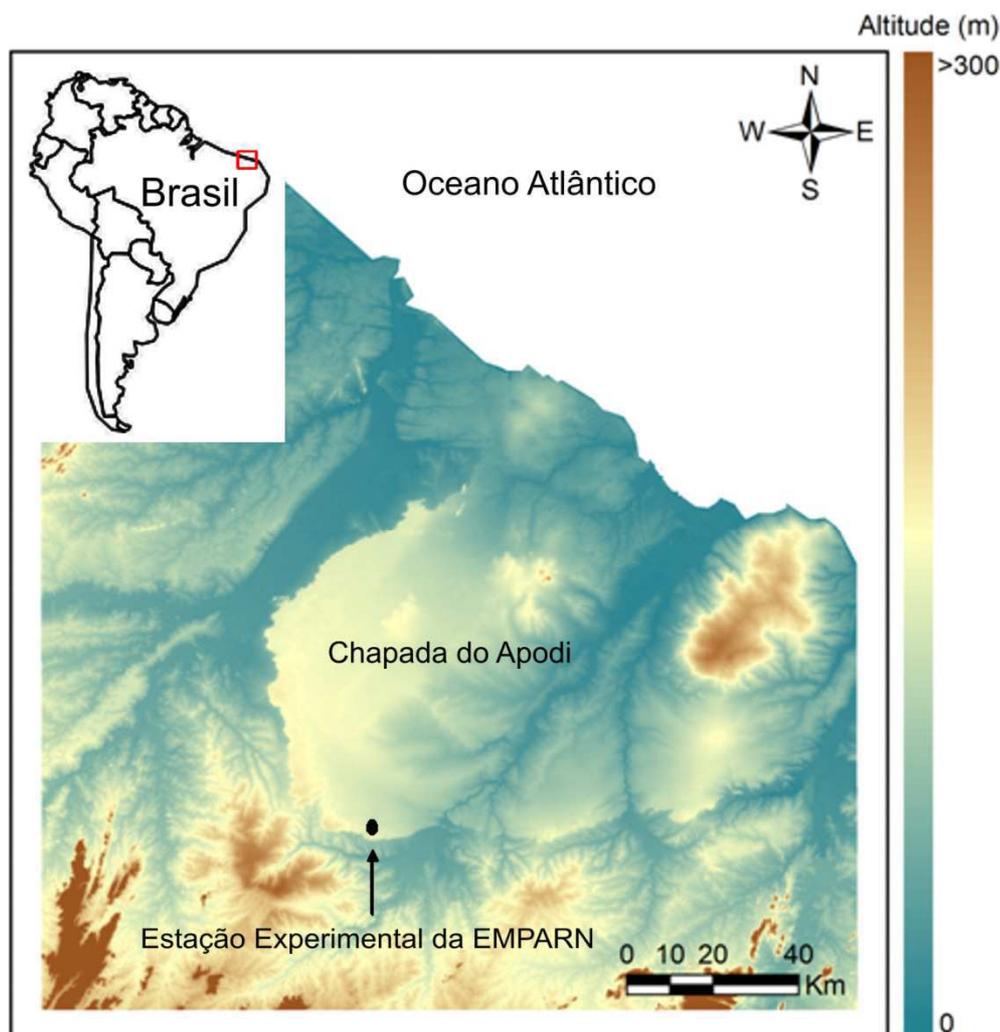


Figura 3.1: Localização da área experimental em relação ao Brasil (retângulo vermelho), e mapa de elevação digital da região em torno da Chapada do Apodi

O clima da região, de acordo com a classificação climática de Thornthwaite (1948), é do tipo DA'da', isto é, semiárido, megatérmico, pequeno ou nenhum excesso de água e concentração da evapotranspiração potencial

no trimestre mais quente (novembro, dezembro e janeiro). A precipitação média anual é de 920 mm, com quadra mais chuvosa se estendendo de março a junho. Os solos da área experimental são classificados como Cambissolo Eutrófico, textura Franco-Argilo-Arenoso, de acordo com a classificação de Lemos e Santos (1996). Sua composição textural é de 57% de areia, 9% de silte e 34% de argila.

3.2 – O modelo SWAP

O modelo SWAP foi aplicado para avaliar o desempenho da irrigação do algodoeiro mediante simulação da evapotranspiração e da produtividade da cultura submetida e sete tratamentos de água diferenciados com base no déficit de irrigação (DI). O modelo SWAP é um modelo de simulação integrada de base física para o transporte de água, calor e de solutos na zona saturada/insaturada relacionado com o crescimento e o desenvolvimento das culturas. A versão utilizada neste estudo foi o SWAP 3.2, a qual está descrita em Kroes et al. (2008).

O cerne do modelo SWAP é a modelagem dos fluxos verticais de água nas zonas saturada ou insaturada, a qual pode ser descrita pela equação de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - S_a(h) - S_d(h) - S_m(h) \quad 3.1$$

onde: θ denota o teor de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), t é o tempo (d), h é a pressão matricial (cm), z é a coordenada vertical (cm), $k(\theta)$ é a condutividade hidráulica como função do teor de água no solo (cm d^{-1}). $S_a(h)$ é a taxa de

extração de água do solo pelas raízes das plantas ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$), $S_d(h)$ é a taxa de extração de água pela drenagem da zona de saturação (d^{-1}) e $S_m(h)$ é a taxa de troca com os macroporos (d^{-1}) (Kroes et al., 2008).

As funções hidráulicas do solo foram definidas como relação entre a condutividade hidráulica K , teor de água no solo θ e a pressão do solo h . Foram usadas as funções de VGM (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980) para definir a curva de retenção de umidade:

$$\theta(h) = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{[1 + |\alpha \cdot h|^n]^{n-1/m}} \quad 3.2$$

onde: θ_{res} é o teor de água residual do solo, θ_{sat} é o teor de água no solo na condição de saturação, α e n e m são fatores empíricos. O termo m utilizado pelo SWAP é definido como sendo dependente do fator n , através da seguinte relação:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad 3.3$$

O SWAP faz o uso da relação $\theta(h)$ e aplica a teoria da condutividade hidráulica não saturada de Mualem (1976), para definir a função de $K(\theta)$, como segue:

$$K(\theta) = K_{sat} \cdot S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad 3.4$$

onde: K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (cm d^{-1}), λ é um parâmetro (-), dependendo de $\partial K / \partial h$ e S_e é a saturação relativa, definida como:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{sat}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad 3.5$$

A solução numérica para a equação de Richards exige uma aproximação diferencial da capacidade de água C (cm^{-1}). Uma expressão é obtida tomando a derivada de θ em relação a h , qual seja:

$$C = \frac{\partial \theta}{\partial h} = \alpha \cdot m \cdot n \cdot |\alpha \cdot h|^{n-1} (\theta_{sat} - \theta_{res}) (1 + |\alpha h|^n)^{-(m+1)} \quad 3.6$$

3.2.1 – Evapotranspiração da Cultura

A modelo SWAP estima os componentes da ETc separadamente, ou seja, a transpiração da cultura T_a e evaporação do solo e/ou da água interceptada pelo dossel da cultura E_a , conforme a equação seguinte:

$$ETc = T_a + E_a \quad 3.7$$

A T_a é estimada a partir da taxa de extração potencial da água pelo sistema radicular da planta $S_p(z)$, levando em consideração a densidade do comprimento radicular $\ell_{raiz}(z)$ (cm cm^{-3}). Para certa profundidade no solo é calculada por:

$$S_p(z) = \frac{\ell_{raiz}(z)}{\int_{-D_{raiz}}^0 \ell_{raiz}(z) dz} \quad 3.8$$

onde: D_{raiz} é a espessura da camada do sistema radicular.

De acordo com Kroes et al. (2008), o valor da $S_p(z)$ é reduzido pelos estresses hídrico e salino devido as condições de elevado ou reduzido teor de água no solo e/ou alta concentração de salinidade. O estresse hídrico é

descrito no SWAP pela função proposta por Feddes et al. (1978), a qual é retratada na Figura. 3.2. No intervalo $h_3 < h < h_2$ a captação de água pelo sistema radicular acontece na condição ideal (Kroes et al., 2008). Ainda de acordo com Kroes et al. (2008), abaixo de h_3 a captação de água pelo sistema radicular diminui de forma linear devido a secagem do solo até zero em h_4 (ponto de murcha). Acima de h_2 a captação de água pelas raízes diminui de forma linear, devido à insuficiência de areação até zero em h_1 . A pressão matricial crítica h_3 aumenta para maiores taxas de transpiração potencial T_p .

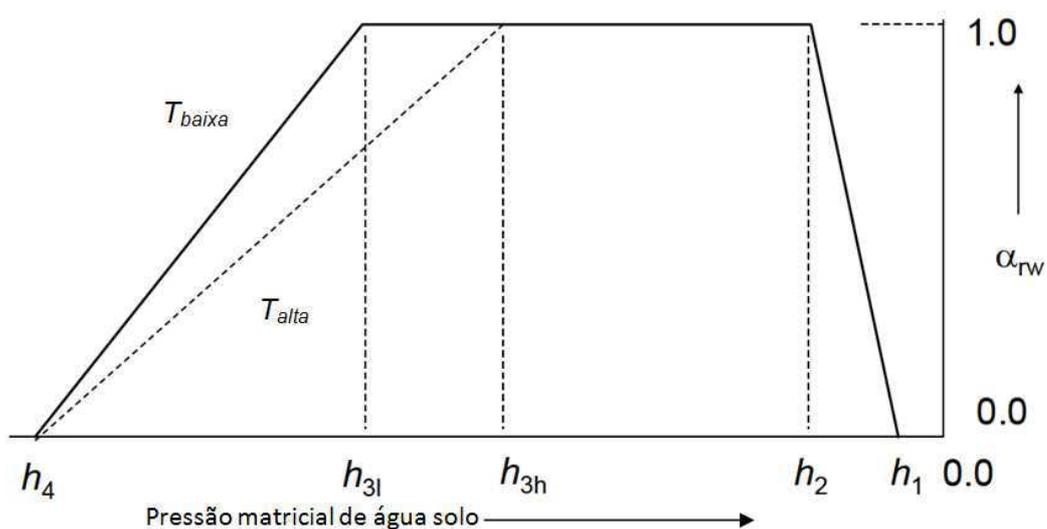


Figura 3.2: Coeficiente de redução para extração de água pelo sistema radicular, α_w , como função da pressão matricial de água no solo (h) e a taxa de transpiração potencial (T). Adaptado de Kroes et al. (2008)

Para o estresse salino o SWAP utiliza a função de resposta de Maas e Hoffman (1977) conforme ilustrado na Figura 3.3. Concentrações abaixo de salinidade da EC_{max} (dS/m) sem estresse salino são adotadas. Em níveis de salinidade acima EC_{max} a raiz diminui a absorção de água a uma taxa de EC_{slope} (m/dS).

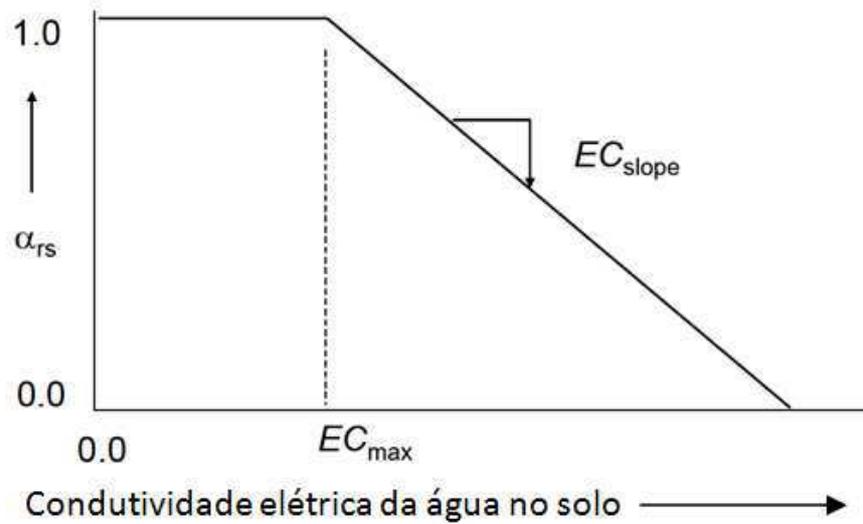


Figura 3.3: coeficiente de redução para extração de água pelas raízes, α_{rs} , como função da condutividade elétrica da água no solo. Adaptado de Kroes et al. (2008)

Em casos que ocorrem simultaneamente os estresses hídrico e salino, a taxa de extração de água pelas raízes $S_a(z)$ é calculada como produto dos coeficientes redução, conforme a equação seguinte:

$$S_a(z) = \alpha_{rd} \cdot \alpha_{rw} \cdot \alpha_{rs} \cdot S_p(z) \quad 3.9$$

onde: α_{rd} e α_{rw} são os coeficientes de redução para o estresse hídrico seco e úmido, respectivamente e α_{rs} é o coeficiente de estresse salino.

Assim, a transpiração real da cultura (T_a) é estimada através da integração de $S_a(z)$ ao longo da profundidade, até alcançar todo o sistema radicular, D_{raiz} :

$$T_a = \int_{-D_{raiz}}^0 S_a(z) dz \quad 3.10$$

A evaporação real do solo é estimada pelo SWAP a partir da função empírica de Black et al. (1969), como:

$$\sum E_a = \beta_1 \cdot t_{seco}^{1/2} \quad 3.11$$

onde: β_1 é o coeficiente de evaporação do solo de Black (cm d^{-0,5}).

3.2.2 – Produtividade do algodoeiro

O crescimento e desenvolvimento do algodoeiro foram simulados através da aplicação do módulo de simulação detalhado da cultura baseado no WOFOST (Supit et al., 1994; Wolf, 2003). A Figura 3.4 ilustra os principais processos do desenvolvimento e crescimento da cultura, incorporados no WOFOST. A energia absorvida pelo dossel é uma função da radiação solar incidente e da área foliar da cultura. Usando a radiação absorvida e levando em conta as características fotossintéticas das folhas, a fotossíntese potencial bruta é calculada. A fotossíntese potencial bruta é reduzida devido aos estresse hídricos e/ou salino, quantificada pela transpiração relativa, e pelos rendimentos brutos da fotossíntese (Kroes et al., 2008). Ainda de acordo com Kroes et al. (2008), parte dos carboidratos (CH₂O) produzidos são usados para fornecer energia para a manutenção da biomassa viva (respiração de manutenção). Os carboidratos restantes são convertidos em matéria estrutural. A matéria seca produzida é dividida entre raízes, folhas, caules e órgãos de armazenamento, utilizando os fatores de particionamento que são uma função do estágio de desenvolvimento fenológico da cultura (Spitters et al., 1989). A

fração particionada para as folhas, determina o desenvolvimento da área foliar e, conseqüentemente, a dinâmica de interceptação de luz. O peso seco das partes da planta são obtidas através da integração de suas taxas de crescimento ao longo do tempo. Durante o desenvolvimento da cultura, parte da biomassa viva morre devido à senescência.

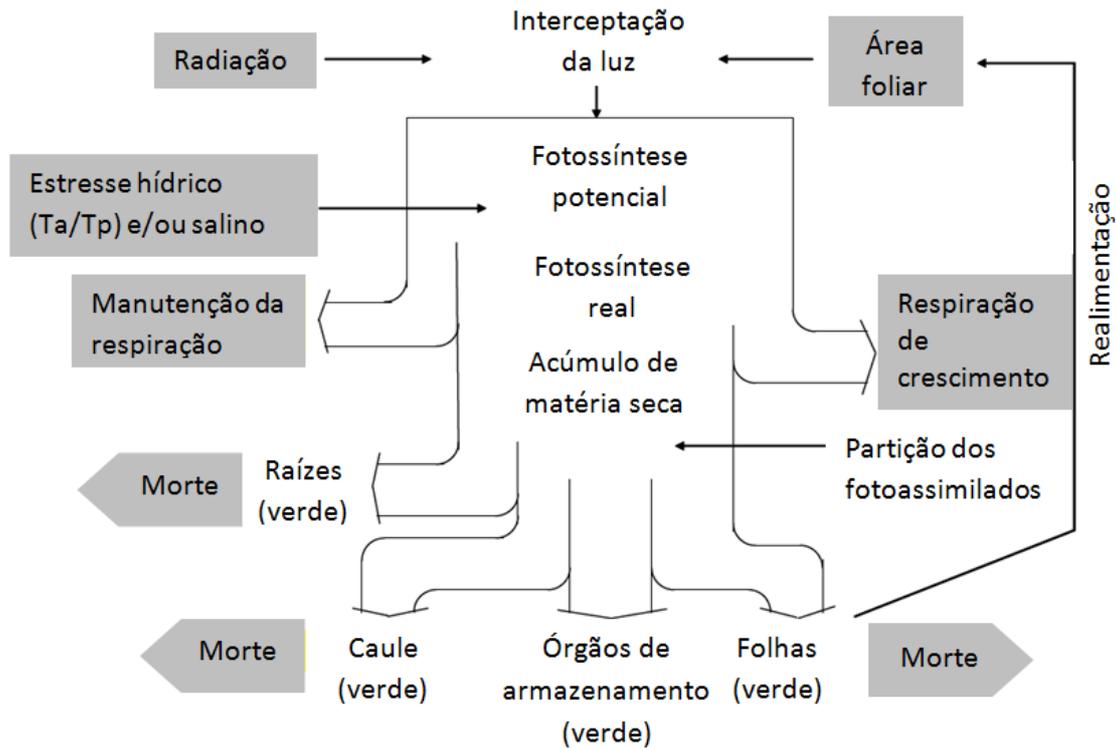


Figura 3.4: Representação simplificada dos processos de desenvolvimento e crescimento de culturas incorporado ao módulo detalhado do modelo SWAP. Adaptado de Kroes et al. (2008)

O cômputo da assimilação potencial bruta - $A_{p\ gross}$ ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) da cultura sobre ótimas condições, baseada na radiação solar incidente absorvida pelo dossel da cultura e característica fotossintéticas das folhas, é obtida por:

$$A_{p\ gross} = A_{max} \left(1 - e^{-A_{p\ gross} \frac{\epsilon_{PAR} PAR_{L,a}}{A_{max}}} \right) \quad 3.12$$

onde: A_{max} representa a máxima taxa de assimilação ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$), ϵ_{PAR} é a eficiência do uso da luz ($\text{kg CO}_2 \text{ J}^{-1}$) e $PAR_{L,a}$ é a taxa da radiação absorvida ($\text{J m}^{-2} \text{ folha d}^{-1}$) a uma profundidade L do dossel.

3.2.3 – Estágio de desenvolvimento da cultura

A simulação do crescimento da cultura teve início na data de emergência e avança por sucessivos estágios. O estágio de desenvolvimento é calculado pelos graus-dias acumulados, assumindo os valores de 0 para a emergência, 1 para o início da floração e 2 para a maturação. O desenvolvimento da cultura anterior a antese é controlado pela temperatura e/ou pelo fotoperíodo (Barros, 2010). Após a antese, ainda de acordo com Barros (2010), apenas a temperatura afeta a taxa de desenvolvimento. Na Figura 3.5 está apresentada uma representação simplificada dos estágios de desenvolvimento da cultura considerado no WOFOST.

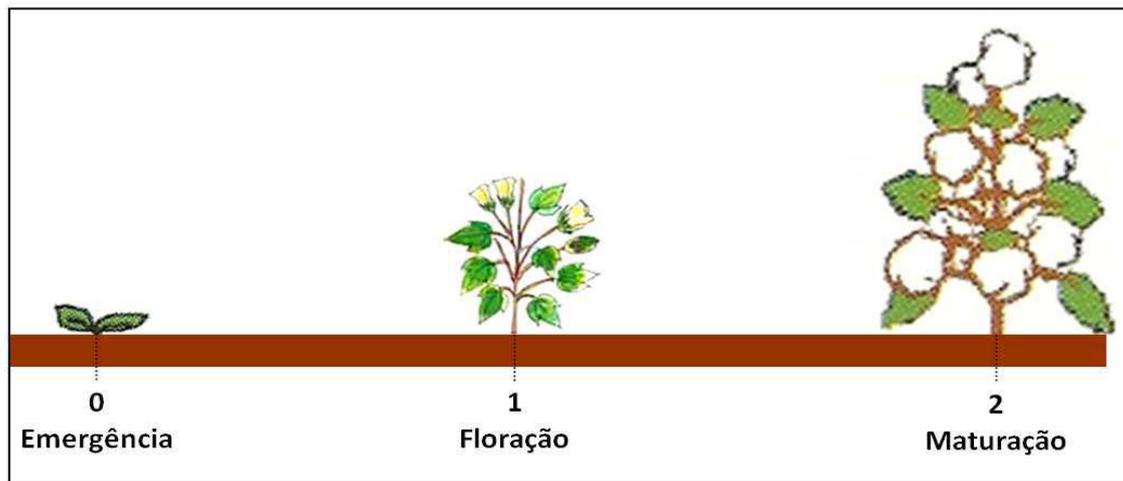


Figura 3.5: Representação simplificada dos estágios de desenvolvimento da cultura considerado no WOFOST. Adaptado de Kroes et al. (2008)

A definição do estágio de desenvolvimento da cultura foi feita de acordo com a equação seguinte:

$$D_s^{j+1} = D_s^j + \frac{T_j - T_b}{GDD} \quad 3.13$$

em que: T_j é a temperatura média do dia j ($^{\circ}\text{C}$), D_j é o estágio de desenvolvimento da cultura no dia j , GDD é o número de graus-dia acumulados para completar o estágio e T_b é a temperatura base ($^{\circ}\text{C}$).

3.3 – Calibração do modelo SWAP- WOFOST

3.3.1 – Funções hidráulicas do solo

O modelo SWAP foi calibrado utilizando os dados oriundos de duas campanhas experimentais realizadas nas respectivas estações secas dos anos de 2008 e 2009, além de dados da literatura de regiões de climas similares ao da região aqui estudada.

A determinação das funções hidráulicas do solo constituiu a etapa mais importante da calibração do modelo SWAP. Os parâmetro de VGM foram determinadas com base na curva de retenção de seis perfis – (0 – 10 cm), (10 – 20 cm), (20 – 30 cm), (30 – 40 cm), (40 – 60 cm) e (60 – 100 cm) de três pontos estratégicos do campo de algodão. A curva de retenção dos referidos perfis foi determinada no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e os parâmetros de VGM foram determinados utilizando o software SWRC – Soil Water Retention Curve versão 2.0 (Dourado-Neto et al., 2000).

A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada em campo, admitindo a ausência de lençol freático, através do Método do “Auger-hole-

inverso”, também conhecido com método Porchet (Cruciani, 1987; Guerra, 2004). Foi aberto um poço de 60 cm de profundidade com 8,3 cm de diâmetro, que foi cheio com água e então se esperou atingir a condição de saturação. Em seguida, foram coletadas medidas da velocidade de descida da água. De posse das medidas, então foi calculada a condutividade hidráulica, utilizando-se a seguinte equação:

$$K_{sat} = 1,15 \cdot r \cdot \frac{\left[\left(\log(h_1 + r/2) - \log(h_2 + r/2) \right) \right]}{t_2 - t_1} \quad 3.14$$

onde: r é o raio do poço, h_1 e h_2 são as respectivas alturas ocupadas pela água em relação à superfície nos tempo t_1 e t_2 .

3.3.2 – Parâmetros da cultura

A definição dos parâmetros específicos da cultura a ser estudada também constitui uma etapa importante da calibração do modelo. Os valores dos referidos parâmetros utilizados na presente pesquisa foram derivados da literatura, que por sua vez foram obtidos em regiões que apresentam condições climáticas similares à região estudada na presente pesquisa (Penning de Vries et al., 1989, Sarwar et al., 2000; Sarwar e Feddes, 2000; Singh et al., 2006a, Howell et al., 2004, Ko et al., 2009, Burke e Wanjura, 2010; Qureshi et al., 2010).

Após a definição dos parâmetros supracitados o modelo SWAP foi executado e então foi feita a primeira comparação entre os resultados da ETC, do Índice de Área Foliar (IAF), da produtividade e do teor de água no solo simulados pelo SWAP com os valores observados em campo. Esta comparação constou de uma análise estatística, cujos parâmetros utilizados estão apresentados no item 3.6. O principal critério adotado para o ajuste do

modelo foi o indicativo de desempenho mínimo de “bom” ou “muito bom”, estabelecido por Camargo e Sentelhas (1997) e apresentado na Tabela 3.2. Outro critério adotado foi que os parâmetros r (coeficiente de Pearson), EM (Erro Médio) e RMSE apresentassem compatibilidade com os valores encontrados na literatura internacional.

Além dos parâmetros do solo e da cultura, outros parâmetros também foram derivados de dados experimentais e/ou ajustados manualmente através do método da “tentativa e erro”. Alguns desses parâmetros estão sumarizados na tabela seguinte:

Tabela 3.1: Parâmetros de entrada do módulo de simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura

Parâmetro	Definição
CF	Fator de cultura
TDWI	Peso inicial total da matéria seca
LAIEM	Índice de área foliar na emergência
RGRLAI	Máximo incremento relativo do índice de área foliar
CVL	Eficiência da conversão em folhas
CVO	Eficiência da conversão em órgãos de reprodução
CVR	Eficiência da conversão em raízes
CVS	Eficiência da conversão em caules

3.3.3 – Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade do modelo SWAP foi feita de forma otimizada utilizando o modelo PEST (Parameter Stimation) (Doherty, 2005). Nesse procedimento foi analisada a sensibilidade da T_a com relação à variação de

cada parâmetro VGM. A escolha dos parâmetros de VGM e da T_a deve-se a importância dos parâmetros do solo no processo de calibração do SWAP (Droogers et al., 2010; Singh et al., 2010a) e da T_a como principal componente do processo de evapotranspiração real da cultura, que por sua vez é um parâmetro chave na elaboração de estratégias de manejo de irrigação. Os valores dos parâmetros de VGM foram alterados a partir de seus valores iniciais e utilizando o PEST. O SWAP foi executado inúmeras vezes, cada uma delas com um valor diferente para cada parâmetro de VGM e mudanças na T_a foram verificadas. Os parâmetros VGM que não afetam consideravelmente a saída (T_a) podem ser considerados não sensíveis na análise. O erro quadrático médio (RMSE, Equação 3.25) foi utilizado para quantificar as diferenças entre os T_a modelado e o valor de referência para indicar a sensibilidade T_a com os parâmetros de VGM.

3.4 – Campanhas Experimentais

3.4.1 – Práticas Culturais e Irrigação

As campanhas experimentais foram realizadas em área de 3,0 ha cultivada com algodão herbáceo (*Gossipium hirsutum L., cultivar BRS 187 8H*) irrigado por aspersão convencional três vezes por semana de modo a manter o conteúdo de água no solo acima de 60% da capacidade água disponível, que é o nível de esgotamento de água recomendada para a cultura do algodão conforme Sousa et al. (2002). A cultura foi semeada obedecendo a um espaçamento de 0,9 m entre fileiras e uma densidade de 12 plantas m^{-1} , perfazendo um total de aproximadamente 133.000 plantas ha^{-1} .

A fertilização em 2008 foi de 20,0 kg ha⁻¹ de Nitrogênio (N), 60,0 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 40,0 kg ha⁻¹ de K₂O e 2,0 kg ha⁻¹ de Boro (B) na semeadura e 90,0 kg ha⁻¹ de N de adubação de cobertura aos 40 dias após a emergência – DAE. Na campanha de 2009 foram aplicados 18 kg ha⁻¹ de N, 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 54 kg ha⁻¹ de K₂O e 2 Kg ha⁻¹ de B na semeadura e duas adubações de cobertura de 100 e 60 kg ha⁻¹ de N aos 28 e 59 DAE, respectivamente.

3.4.2 – ETc do algodão

Para calibração e validação do modelo SWAP-WOFOST e para determinação da curva do K_c, foi obtida a ETc da cultura do algodão a partir de duas campanhas experimentais realizadas durante as estações secas dos anos de 2008 e 2009. A ETc foi determinada diariamente para todo o ciclo fenológico da cultura nos dois anos de observação, a partir do fluxo de calor latente (LE) obtido pelo balanço de energia baseado na razão de Bowen (BERB) (Perez et al., 1999; Azevedo et al., 2003; Inmam-Bamber e McGlinchey, 2003; Silva et al., 2007; Hou et al., 2010) pela equação seguinte:

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad 3.15$$

onde: Rn é o saldo de radiação (W m⁻²), G (W m⁻²) o fluxo de calor no solo e β a razão de Bowen. De acordo com Perez et al. (1999), para o cálculo do fluxo de calor latente foi considerado o período do dia com energia disponível positiva, (Rn – G > 0), sendo o cálculo de β, efetuado por meio das equações seguintes:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{P \cdot c_p}{L\varepsilon} \cdot \left(\frac{K_H}{K_W} \right) \cdot \left(\frac{\partial T / \partial z}{\partial e / \partial z} \right) \quad 3.16$$

onde: P é a pressão atmosférica (KPa), c_p é o calor específico do ar a pressão constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), L é calor latente de evaporação da água (MJ kg^{-1}), ε é a razão entre as massas moleculares da água e do ar seco (0,622), K_H e K_w são os coeficientes de trocas turbulentas de calor sensível e de vapor de água, respectivamente, $\partial T/\partial z$ e $\partial e/\partial z$ são os gradientes de temperatura e pressão de vapor, respectivamente. Considerando que $P \cdot c_p/L\varepsilon = \gamma$ ($\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), que é a constante psicrométrica, que $K_H \cong K_w$ (Verma et al., 1978) e que $\left(\frac{\partial T/\partial z}{\partial e/\partial z}\right) = \Delta T/\Delta e$, a razão de Bowen foi calculada por:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad 3.17$$

onde: ΔT é o gradiente de temperatura ($^\circ\text{C}$) e Δe é o gradiente de pressão real de vapor de água (KPa). Os referidos gradientes foram obtidos através das medidas das temperaturas seca e úmida em dois níveis acima do dossel vegetativo através de termopares tipo T (cobre-constantan).

O saldo de radiação R_n foi obtido por um saldo radiômetro NR-LITE (*Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands*), enquanto que o fluxo de calor no solo – G foi medido por placas HFP01SC-L Self-Calibrating Soil Heat Flux Plate (*Hukseflux Thermal Sensors, Delft, The Netherlands*) a 0,02 m de profundidade. Todos sinais dos sensores foram coletas a cada 5 segundos e armazenadas médias de 20 minutos num sistema de aquisição de dados CR3000 (*Campbell Sci., Logan-UT, USA*).



Figura 3.6: A fotografia da esquerda apresenta a torre micrometeorológica destinada ao BERB instalada no campo de algodão em Apodi - RN, enquanto que a da direita mostra momento da coleta dos dados

3.4.3 – Curva do K_c

Para determinação da curva do K_c foi necessário identificar os quatro estágios de crescimento da cultura, os quais foram elaborados com base em observações de campo e metodologia da FAO-56 (Allen et al., 1998), como segue:

- Estágio Inicial: período da emergência até a cultura propiciar aproximadamente 10% de cobertura do solo;
- Desenvolvimento da cultura: período dos 10% cobertura do solo até efetiva cobertura do solo ou início da floração;
- Estágio Médio: início da floração até início da maturação;
- Último Estágio: Início da maturação até o final da maturação.

A curva do k_c foi construída a partir dos valores do k_c dos estágios inicial ($K_{c\text{-ini}}$), médio ($K_{c\text{-med}}$) e final ($K_{c\text{-fin}}$). O valor do K_c foi calculado pela equação seguinte:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad 3.18$$

Os valores do $K_{c\text{-ini}}$, $K_{c\text{-med}}$ correspondem as medias dos valores calculados durante os estágios inicial e médio, respectivamente, enquanto que o $K_{c\text{-fin}}$, por sua vez, corresponde ao valor observado na maturação total no final do ciclo da cultura.

A evapotranspiração de referência ET_0 foi calculada fazendo o uso do método FAO-56 (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad 3.19$$

onde: Δ é a tangente à curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), Rn é o saldo de radiação diário ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), embora que para o período diário o mesmo é considerado nulo; T é a temperatura média diária ($^\circ\text{C}$); u_2 é a velocidade média diária do vento a 2,0 m de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação média diária (kPa); e_a é a média diária da pressão real de vapor (kPa).

A determinação da ET_0 se faz necessária para determinação da curva do coeficiente de cultura (K_c) e constitui um dado de entrada do modelo SWAP, sendo a mesma uma de suas condições de contorno.

Os dados meteorológicos utilizados no cálculo da ET_0 foram coletados na estação meteorológica de Apodi-RN ($5^\circ 37' 37''\text{S}$; $37^\circ 49' 54''\text{W}$; 150 m de

elevação) pertencente a rede de estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A curva do K_c foi determinada visando atender a demanda por uma tecnologia simples e eficaz para a determinação da ET_c . Outro fator importante da geração da curva do K_c é que a utilização dos valores listados na FAO-56, que são valores para situações generalizadas, pode gerar incertezas na determinação da ET_c (Hunsaker et al., 2003; Farahani et al., 2008)

3.4.4 – Teor de água no solo

O teor de água no solo foi medido duas vezes por semana com uma Sonda de Perfil PR2 (Profile Probe type PR2, Delta-T Devices Ltd.) acoplada a um medidor de umidade HH2 Moisture Meter (Delta-T Devices Ltd.). As medidas foram realizadas nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm.



Figura 3.7: Coleta de dados de umidade de solo com a sonda PR2

3.4.5 – Altura, biomassa e área foliar das plantas

As medidas da altura da planta, biomassa fresca, biomassa seca e área foliar foram tomadas a cada 15 dias, perfazendo um total de 7 medidas.

Foi coletada uma planta representativa e então feita a pesagem da matéria fresca. Em seguida, eram separadas folhas, caule e sistema radicular e encaminhadas ao Laboratório de Irrigação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) – Mossoró-RN, onde foram feitas medidas da área foliar e das fitomassas fresca e seca.

As medidas da área foliar da planta foram feitas com um *LI-3100C Area Meter* (*LI-COR Bioscience, Lincoln-NE, USA*), enquanto que a pesagem da biomassa seca foi feita após da secagem do material em estufa.

3.4.6 – Produtividade das culturas

A produtividade das culturas foi obtida por meio da colheita de parcelas amostrais e em seguida extrapolada para o campo.

3.5 – Eficiência de Uso da Água (EUA)

O desempenho da irrigação foi avaliado a partir da Eficiência de Uso da Água (EUA), a qual foi obtida em termos da ET_c ($m^3 ha^{-1}$) e da irrigação aplicada Irr ($m^3 ha^{-1}$) conforme as expressões seguintes:

$$EUA_{ET_c} = \frac{PROD(kg ha^{-1})}{ET_c(m^3 ha^{-1})} \quad 3.20$$

$$EUA_{Irr} = \frac{PROD(kg ha^{-1})}{Irr(m^3 ha^{-1})} \quad 3.21$$

em que: PROD é a produtividade ou rendimento da cultura ($Kg ha^{-1}$);

3.6 – Análise Estatística – Calibração e validação do modelo SWAP

O nível das diferenças entre os dados simulados e observados foi avaliado pelo R (coeficiente de Pearson), EMP (Erro Médio Percentual), EM

(Erro Médio), RMSE (Raiz Quadrática do Erro Médio), d – índice de concordância de Willmott (1982), c (índice de confiança) proposto por Camargo e Sentelhas (1997) e o teste t-Student pelas equações seguintes:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad 3.22$$

$$EMP(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - S_i}{O_i} \right| \cdot 100\% \quad 3.23$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad 3.24$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad 3.25$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, 0 \leq d \leq 1 \quad 3.26$$

$$c = R \cdot d \quad 3.27$$

$$t = \frac{\bar{O} - \bar{S}}{\sqrt{s^2 \cdot \left(\frac{1}{N_{obs}} - \frac{1}{N_{sim}} \right)}} \quad 3.28$$

em que: O_i é o valor observado, S_i é o valor simulado, \bar{O} é a média dos valores observado e \bar{S} é a média dos valores simulados, s^2 é a variância, N_{obs} e N_{sim} são os tamanhos das amostras observadas e simuladas, respectivamente.

O critério do índice de confiança proposto por Camargo e Sentelhas (1997) é apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Critérios para avaliação de desempenho do índice de confiança c

Valor de c	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 – 0,85	Muito Bom
0,66 – 0,75	Bom
0,61 – 0,65	Mediano
0,51 – 0,60	Sufrível
0,41 – 0,50	Ruim
≤ 0,40	Péssimo

3.7 – Tratamento de água – Aplicação do modelo SWAP

Depois de calibrado e validado o modelo SWAP foi utilizado para simular o efeito de diferentes opções de manejo de água (tratamentos) baseado em diferentes níveis de déficit de irrigação na produtividade e na ETc do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H em Apodi-RN. Os tratamentos considerados nas simulações como fração da lâmina de irrigação aplicada foram as seguintes:

1. T1-40%: $I = 0,40 \cdot (\text{Lâmina de irrigação total})$
2. T2-60%: $I = 0,60 \cdot (\text{Lâmina de irrigação total});$
3. T3-75%: $I = 0,75 \cdot (\text{Lâmina de irrigação total});$
4. T4-80%: $I = 0,80 \cdot (\text{Lâmina de irrigação total});$
5. T5-90%: $I = 0,90 \cdot (\text{Lâmina de irrigação total});$
6. T6-100%; $I = 1,00 \cdot (\text{Lâmina de irrigação total});$
7. T7-130%: $I = 1,30 \cdot (\text{Lâmina de irrigação total});$

Para as simulações dessas lâminas de água aplicada tomou-se por base o tratamento 100% de água aplicada, ou seja, a lâmina de irrigação aplicada no período de cada campanha experimental em 2008 e 2009.

O efeito do estresse hídrico durante o estágio de desenvolvimento na produção do algodoeiro foi investigado pelo modelo de Stewart (Stewart et al., 1977; Doorenbos e Kassam, 1979), descrito por:

$$\left(1 - \frac{Prod}{Prod_m}\right) = k_y \left(1 - \frac{ETc}{ETm}\right) \quad 3.29$$

em que: $Prod$ é a produtividade real colhida em determinado tratamento ($kg\ ha^{-1}$), $Prod_m$ é a produtividade máxima colhida ($kg\ ha^{-1}$), k_y é o fator resposta da cultura, ETc é a evapotranspiração real da cultura (mm) e ETm é a evapotranspiração máxima, $1 - (Prod/Prod_m)$ é o decréscimo relativo da produtividade e $1 - (ETc/ETm)$ é o déficit relativo da evapotranspiração.

4.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Evapotranspiração de Referência e Evapotranspiração da Cultura

Os dados meteorológicos observados durante o ciclo fenológico da cultura em ambas as campanhas experimentais estão apresentadas na Tabela 4.1. Durante o ciclo da cultura em ambos os anos não ocorreu precipitação. Observando os valores médios da ET_0 constata-se que a demanda hídrica da atmosfera da região é elevada de acordo com critérios estabelecidos na FAO-56 (Allen et al., 1998), uma vez que as referidas médias observadas foram superiores a $7,0 \text{ mm d}^{-1}$ em ambas as campanhas. Analisando e comparando as médias de todos os parâmetros climáticos constata-se que durante a campanha experimental de 2008 a demanda hídrica da atmosférica é superior àquela de 2009, visto que todos os parâmetros meteorológicos são indicativos dessa condição, inclusive o déficit de pressão de vapor (DPV). No entanto, essa diferença deve está associada à diferença da época do ano em que transcorreram as referidas campanhas, conforme atestam as datas de emergência e maturação apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.1: Radiação solar (RS), temperatura do ar (Tar), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a 2 m (u_2), evapotranspiração de referência (ET_0) e o déficit de pressão de vapor (DPV) observados durante o ciclo fenológico do algodoeiro em Apodi-RN em ambas as campanhas experimentais

Mês	RS (MJ m⁻² d⁻¹)	Tar (°C)	UR (%)	u_2 (m s⁻¹)	DPV (Kpa)	ET_0 (mm d⁻¹)
Out/2008	28,7	29,6	50,3	2,9	2,7	8,3
Nov/2008	28,6	29,9	51,8	2,9	2,7	8,2
Dez/2008	24,5	29,9	52,3	2,7	2,6	7,5
Jan/2009	24,5	30,3	52,1	2,8	2,7	7,6
Média	26,6	29,9	51,6	2,8	2,7	7,9
Set/2009	24,3	27,8	59,6	2,2	2,1	6,4
Out/2009	25,2	29,0	56,6	2,6	2,4	7,2
Nov/2009	25,3	29,5	54,0	2,8	2,6	7,6
Dez/2009	21,9	29,6	56,6	2,5	2,4	6,8
Média	24,2	29,0	56,8	2,5	2,4	7,1

O comprimento do ciclo fenológico do algodoeiro herbáceo cultivar BRS 187 8H em Apodi-RN foi de 105 e 112 dias em 2008 e 2009, respectivamente (Tabela 4.2). A extensão do ciclo do algodoeiro na campanha experimental de 2009 em relação a 2008 deveu-se ao fator térmico, uma vez que em 2009 a temperatura média observada durante o período experimental foi quase 1°C inferior a 2008 (Tabela 4.1). Como pode ser visto, a temperatura foi determinante no estabelecimento do comprimento do ciclo fenológico da cultura, uma vez que a unidade térmica, ou os Graus-Dias-Desenvolvimento

(GDD) requeridos pela cultura em ambos os anos foram praticamente iguais, aproximadamente 1500 °C (Tabela 4.2). A média do GDD acumulado de 1502 °C encontra-se dentro da faixa de variação que tem sido observada em várias regiões áridas e/ou semiáridas produtoras de algodão, a exemplo do estado americano do Texas, Oklahoma e Novo México (Peng et al., 1989; Howell et al., 2004; Esparza et al., 2007; Ko et al., 2009) e na Síria (Farahani et al., 2008).

Tabela 4.2: Datas da emergência e da maturação total e do GDD requerido pelo algodoeiro em Apodi-RN

	2008	2009
Emergência	29/set/2008	08/set/2009
Maturação total	12/jan/2009	28/dez/2009
Duração do ciclo (dias)	105	112
GDD (°C) ^a	1499	1506

^aO GDD foi determinado usando a temperatura base de 15,6 °C (Howell et al., 2004; Ko et al., 2009) utilizando do método padrão (Mavi e Tupper, 2004): $GDD = \sum (T_{max} - T_{min})/2 - 15,6$.

A maior demanda hídrica da atmosfera observada em 2008 em relação a 2009, conforme já comentado anteriormente, foi determinante na lâmina de irrigação total aplicada, visto que em 2008 foi 30 mm superior à lâmina aplicada em 2009 conforme a Tabela 4.3, mesmo num período de sete dias mais curto. A diferença das demandas hídricas atmosféricas de ambos os anos também é evidenciada no valor da ET_0 acumulada, a qual em 2008 foi 43 mm superior ao observado em 2009. Os valores das lâminas de irrigação aplicada em cada irrigação estão apresentados na Figura 4.1.

Tabela 4.3: Evapotranspiração de referência e irrigação totais

	2008	2009
ET ₀ acumulada (mm)	835	792
Irrigação Aplicada (mm)	914	884

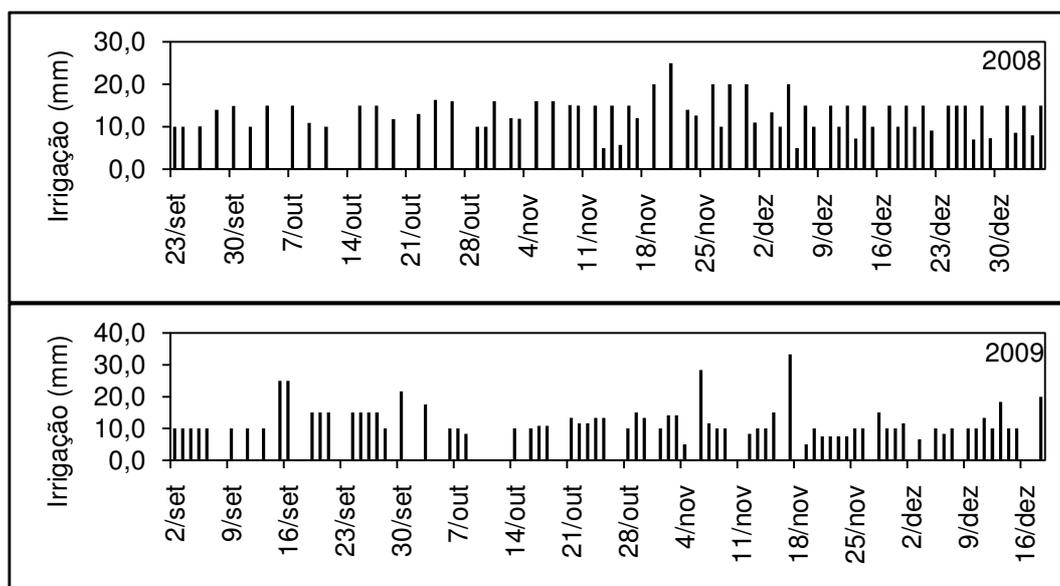


Figura 4.1: Lâmina total de água aplicada em cada irrigação nas campanhas experimentais de 2008 e 2009

Os valores da ET_c do algodão obtidos pela técnica do BERB variaram de 3,7 a 9,3 mm d⁻¹ em 2008 e também de 3,7 a 9,6 mm d⁻¹ em 2009 (Figura 4.2). Os valores mínimos foram observados no estágio inicial, enquanto que os valores máximos foram alcançados no estágio médio em ambas as campanhas, aos 79 dias após a emergência (DAE) em 2008 e aos 45 DAE em 2009. Observa-se que os valores máximos atingidos foram superiores àqueles resultados obtidos em outras áreas do semiárido brasileiro, a exemplo das Várzeas de Sousa no oeste do estado da Paraíba, onde a máxima ET_c foi de 6,2 mm d⁻¹ (Azevedo et al., 1993) e na região do Cariri, sul do estado do Ceará,

que apresentou ETc máxima de 7,0 mm d⁻¹ (Bezerra et al., 2010). Esses resultados evidenciam a necessidade da determinação da ETc em várias áreas do semiárido brasileiro, vez que o mesmo é bastante heterogêneo do ponto de vista meteorológico, com consideráveis diferenças entre os valores da umidade relativa do ar e da velocidade do vento.

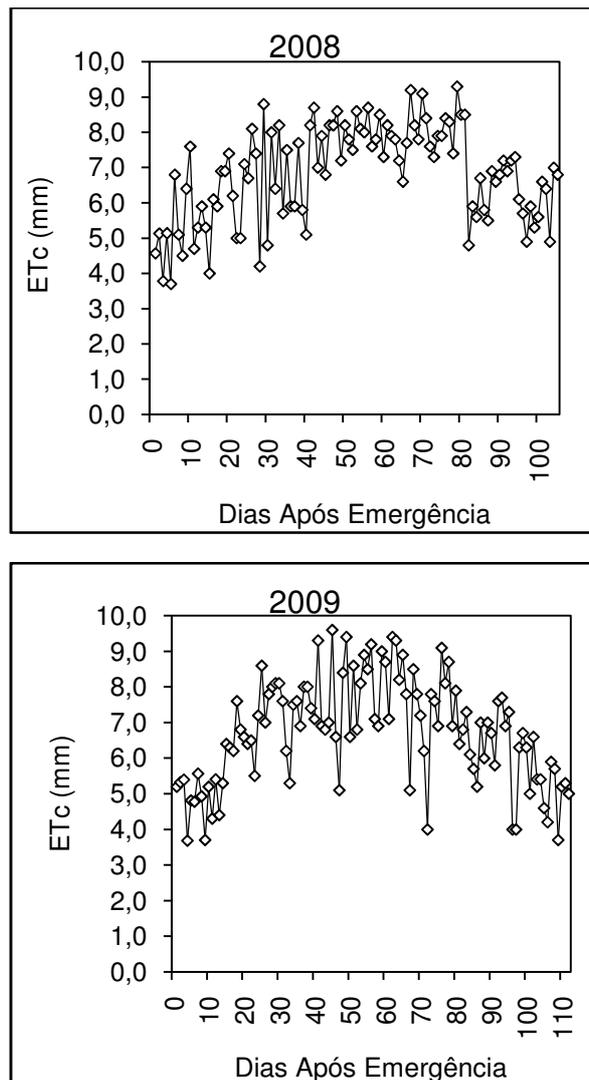


Figura 4.2: ETc diária do algodão herbáceo (cultivar BRS 187 8H) irrigado em Apodi-RN nos anos de 2008 e 2009

Observa-se nas curvas dos valores diários da ETc dos dois anos de observação (Figura 4.2) que ocorreram sucessivas variações nos valores

diários ao longo de todo o ciclo fenológico. Este comportamento também foi notado por Bezerra et al. (2010). As referidas variações, de acordo com Farahani et al. (2008) e Bezerra et al. (2010), são atribuídas às variações da demanda atmosférica que influenciam o processo, caracterizada pela radiação solar, efeito da velocidade do vento e da umidade relativa do ar. Por outro lado, além das variações dos elementos meteorológicos, observa-se também que as referidas variações em grande parte estão associadas aos picos apresentados pela ETc nos dias que sucedem a ocorrência da irrigação principalmente no início do ciclo. Este comportamento também foi constatado por Bezerra et al. (2010) e é absolutamente normal sobretudo quando o sistema de irrigação por aspersão é utilizado, o qual provoca intenso molhamento da superfície e conseqüente elevação nos valores da ETc, pois são adicionadas a ela a evaporação da umidade das camadas superficiais do solo e da água interceptada pelo dossel da cultura (López-Urrea et al., 2009; Cavero et al., 2009).

A ETc acumulada do algodoeiro em Apodi-RN foi 717 e 751 mm em 2008 e 2009, respectivamente. O valor mais elevado da ETc acumulada em 2009 deveu-se ao prolongamento do ciclo fenológico da cultura nesse ano, cujas causas já foram discutidas a priori. Comparando com a literatura, o valor médio de 734 mm da ETc foi inferior aos valores observados em Menemen, no oeste da Turquia (Allen, 2000), em Bushland, Texas, Estados Unidos (Grismer, 2002), na região central do estado americano do Arizona (Hunsaker et al., 2003), ao norte das High Plains do Texas, Estados Unidos (Howell et al., 2004), no norte da Síria (Farahani et al., 2008) e na região de Uvalde, Texas, Estados Unidos (Ko et al., 2009). No entanto, é notado que a ETc mais elevada nos

supracitados estudos estão associados tanto a aridez mais severa das regiões onde os referidos estudos foram realizadas, assim como aos ciclos fenológicos das cultivares utilizadas, que foram aproximadamente 50 dias mais longos do que o da cultivar BRS 187 8H aqui estudada.

Por outro lado, verifica-se que a ET_c obtida na presente pesquisa é consideravelmente superior aos valores obtidos para outras cultivares em outras áreas do semiárido brasileiro a exemplo do oeste do estado da Paraíba (Azevedo et al., 1993) e do sul do estado do Ceará (Bezerra et al., 2010). O menor valor obtido por Azevedo et al. (1993) pode está associado tanto ao fator meteorológico quanto ao menor ciclo da cultivar CNPA Precoce 1 que apresentou um ciclo em torno de 100 dias. Com relação a cultivar BRS-200 Marrom estudada por Bezerra et al. (2010), a diferença neste caso está associada ao comportamento da demanda hídrica da atmosfera local, uma vez que a duração do ciclo fenológico dessa cultivar é praticamente o mesmo da BRS 187 8H, utilizada na presente pesquisa. Em comparação com o sul do estado do Ceará, a região da Chapada do Apodi é aproximadamente 1,2°C mais quente e 3,2% mais seca, conforme a comparação dos dados da Tabela 4.1 com Bezerra et al. (2010).

4.2 – Coeficiente de Cultura – observações de campo

Os valores do K_c dos estádios inicial, médio e final encontrados para o algodão irrigado estão apresentados na Tabela 4.4. O valor médio do K_{c-ini} de 0,74 é bastante similar aos resultados obtidos por Ko et al. (2009); porém, é aproximadamente 40% superior ao valor obtido por Azevedo et al. (1993) também no Semiárido brasileiro e quase três vezes superior aos resultados encontrados na Síria (Farahani et al., 2008) e Louisiana, EUA, (Hribal, 2009).

Tabela 4.4: Valores do K_c determinados experimentalmente para o algodão irrigado em Apodi-RN

	2008	2009	Média
K_{c-ini}	0,65	0,83	0,74
K_{c-med}	1,01	1,03	1,02
K_{c-fin}	0,78	0,76	0,77

Os valores do K_{c-med} foram praticamente os mesmos nos anos de 2008 e 2009 (1,02 e 1,03) e bastante similares aos encontrados por Azevedo et al. (1993), Mohan e Arumugan (1994), Farahani et al. (2008) e Bezerra et al. (2010). Porém, outras regiões potencialmente produtoras de algodão como Arizona, Califórnia, Louisiana e Texas, têm apresentado K_{c-med} invariavelmente superiores (Grismer, 2002; Hunsaker et al., 2003; Ko et al., 2009; Hribal, 2009).

O valor do $K_{c-fin} = 0,77$ é aproximadamente 16% superior aos valores encontrado por Azevedo et al. (1993) e Farahani et al. (2008), porém é inferior aos resultados encontrados por Grismer (2002) e Ko et al. (2009).

Conforme os dados da Tabela 4.4 e as curvas da Figura 4.3 verifica-se que os valores do K_{c-ini} foram bastante discrepantes entre os anos de observação. No entanto, analisando a Tabela 4.5, constata-se que a citada discrepância ocorreu em resposta a sua sensibilidade à lâmina de irrigação. O incremento de 70 mm na irrigação aplicada em 2009 (Tabela 4.5) em relação a 2008 implicou num valor K_{c-ini} quase 20% superior, mesmo com demanda atmosférica menor.

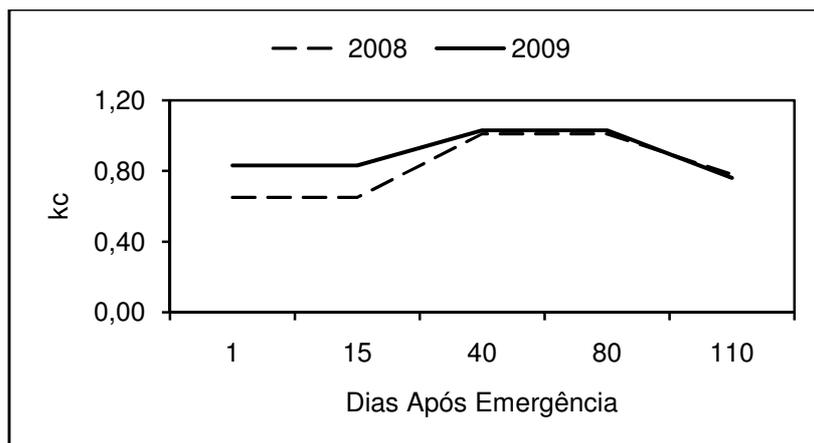


Figura 4.3: Curvas do kc do algodoeiro irrigado na Chapada do Apodi-RN para os anos de 2008 e 2009

A sensibilidade do K_{c-ini} ao manejo de irrigação é conhecida na literatura sendo abordada por vários autores (Jensen et al., 1990; Soares et al., 2001; Farahani et al., 2008, Flumingan e Faria, 2009; López-Urrea et al., 2009). Os elevados valores da ET_c no estágio inicial da cultura ocorrem devido à influência da umidade da superfície do solo oriunda do uso frequente do sistema de irrigação por aspersão (López-Urrea et al., 2009).

Tabela 4.5: Totais de irrigação aplicada e ET_0 média observada durante os estádios inicial, médio e final do algodoeiro em Apodi-RN

	Estádio Inicial		Estádio Médio		Estádio Final	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Irrigação (mm)	120.0	190.0	406.0	388.3	170.0	183.0
ET_0 (mm)	8.4	6.4	8.0	7.5	7.5	6.9

Devido ao freqüente e intenso molhamento da superfície em virtude da irrigação que causou intensas variações nos valores da ET_c diária, conforme já discutido anteriormente, os valores do K_c são apresentados em médias de 5

dias, conforme proposto por López-Urrea et al. (2009), para que uma função polinomial de segundo grau fosse ajustada. A curva do kc tem sido correlacionada com os DAE através de funções polinomiais de segundo grau propiciando bons ajustes (Howell et al., 2004; López-Urrea et al., 2009; Ko et al., 2009).

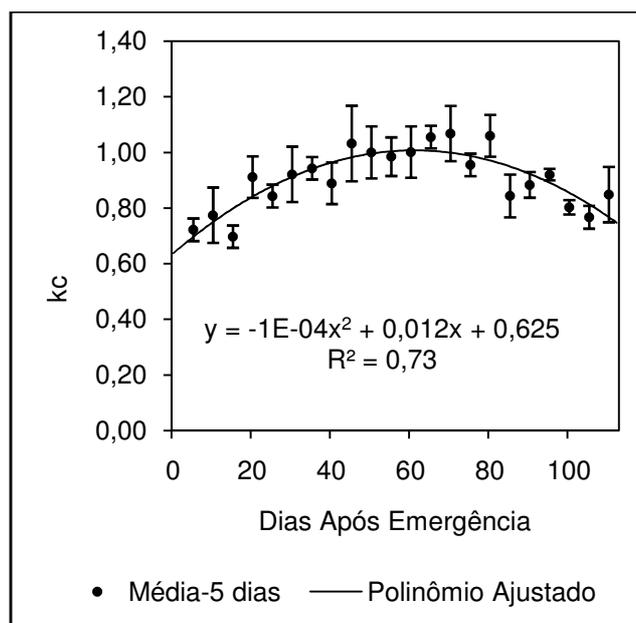


Figura 4.4: Curva do kc apresentada em médias de cada 5 dias versus o DAE ajustada a um polinômio de segundo grau. As barras verticais indicam o desvio padrão de cada média

4.3 – Simulações do SWAP – calibração e validação

4.3.1 – Parâmetro de VGM e da cultura e análise de sensibilidade

Os parâmetros de VGM e da cultura do algodoeiro, os quais constituem as principais variáveis de calibração do modelo estão apresentadas nas Tabelas seguintes:

Tabela 4.6: Parâmetros de VGM e condutividade hidráulica para uma condição saturada

Perfil	θ_{res} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{sat} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α cm^{-1}	n (-)	K_{sat} (cm dia^{-1})
0 – 10 cm	0,069	0,200	0,0690	1,6959	21,60
10 – 20 cm	0,100	0,282	0,0579	1,8731	21,60
20 – 30 cm	0,133	0,313	0,0578	1,8238	21,60
30 – 40 cm	0,156	0,369	0,0561	1,7576	21,60
40 – 60 cm	0,152	0,363	0,0534	1,5945	21,60
60 – 100 cm	0,170	0,350	0,0451	1,6146	21,60

Tabela 4.7: Principais parâmetros da cultura do algodão especificados ao SWAP-WOFOST

Parâmetro	Valor
Temperatura basal, T_b ($^{\circ}\text{C}$)	15,6
Temperatura acima da qual ocorre esterilidade das flores, T_B ($^{\circ}\text{C}$)	34,0
Pressão matricial crítica, h (cm)	
h_1	-1
h_2	-22
h_{3h}	-1200
h_{3l}	-7500
h_4	-16000
Coeficiente de extinção da luz, k	0,45
Eficiência do uso da luz, ϵ ($\text{kg h}^{-1}/\text{J m}^2 \text{s}^{-1}$)	0,40
Máxima taxa de assimilação do CO_2 , A_{max} ($\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$)	50
Nível Crítico, EC_{Max} (dS m^{-1})	7,7
Declínio por unidade de EC, EC_{slope} ($\% \text{dS m}^{-1}$)	5,4

Na Figura 4.5 estão apresentados os gráficos contendo o RMSE da T_a de cada variação dos parâmetros de VGM em relação ao valor de referência.

Como pode ser visto o n e o K_{sat} foram os mais sensíveis, enquanto que o θ_{sat} e o θ_{res} foram os que apresentaram as menores sensibilidades.

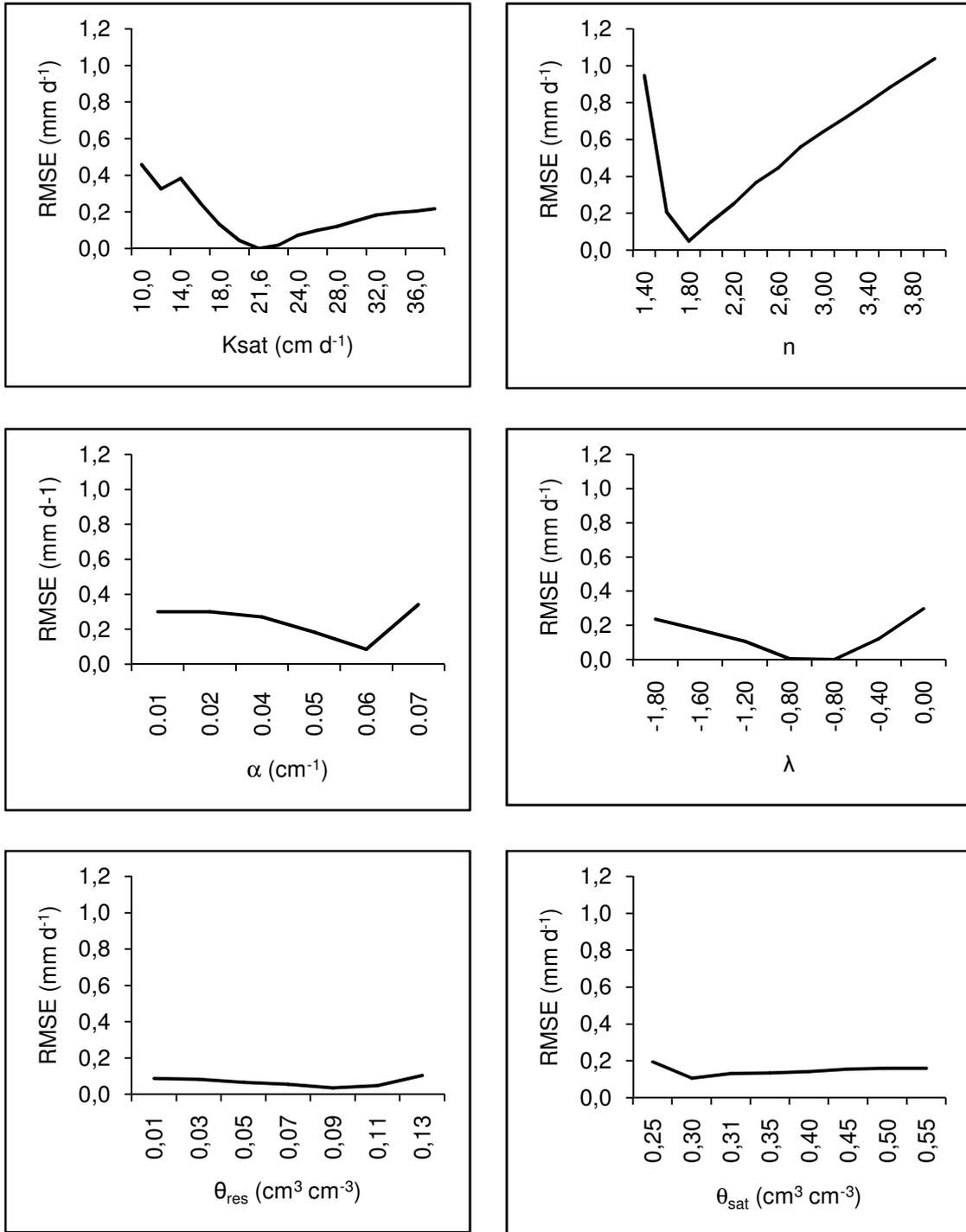


Figura 4.5: Análise de sensibilidade dos parâmetros hidráulicos do solo (RMSE da transpiração modelado como uma função dos parâmetros de VGM)

Esses resultados corroboram com Singh et al. (2010a), embora que no supracitado estudo o RMSE máximo do K_{sat} foi superior a $0,6 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto que no presente estudo o valor máximo foi em torno de $0,5 \text{ mm d}^{-1}$. Os valores do RMSE do θ_{sat} e do θ_{res} foram inferiores a $0,2 \text{ mm d}^{-1}$, similares aos encontrados por Singh et al. (2010a). Nota-se que tanto θ_{sat} como θ_{res} foram menos sensíveis que os parâmetros α e λ .

4.3.2 – Evapotranspiração, Produtividade e IAF

A Figura 4.6 apresenta o ajuste obtido entre os valores da ET_c do algodoeiro simulados pelo SWAP e os obtidos com o método do BERB. Conforme já mencionado e discutido anteriormente, a ET_c acumulada do algodoeiro em Apodi obtida por BERB foi de 717 mm e 751 mm, em 2008 e 2009, respectivamente. Os respectivos valores simulados pelo SWAP foram de 719 mm e 742 mm para os referidos anos estudados, respectivamente. A boa concordância do ajuste obtido apresentado nos gráficos da Figura 4.6 é evidenciada pelo índice de concordância de Willmott (1982) explícito na Tabela 4.8, cujo valor foi de 0,86 e 0,89 em 2008 e 2009, respectivamente. Ainda na referida Tabela está apresentado o índice de confiança c , que apresentou valores de 0,80 em 2008 e 0,72 em 2009 e de acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997) esses valores denotam que os ajustes dos dois anos estudados foram classificados como “muito bom” e “bom”, respectivamente.

Ainda de acordo com a Tabela 4.8, verifica-se que a diferença entre os valores observados e simulados não são significativas a um nível de significância $P < 0,05$, conforme atesta o teste de t-Student, cujos valores nos

anos de 2008 e 2009 são de 0,941 e 0,711, respectivamente. O valor crítico para o nível de significância $P < 0,05$ é de 1,97. As referidas diferenças foram de apenas 2,0 mm em 2008 e 8,4 mm em 2009 o que resultou em valores de EMP(%) de 0,28% e 1,12%, respectivamente.

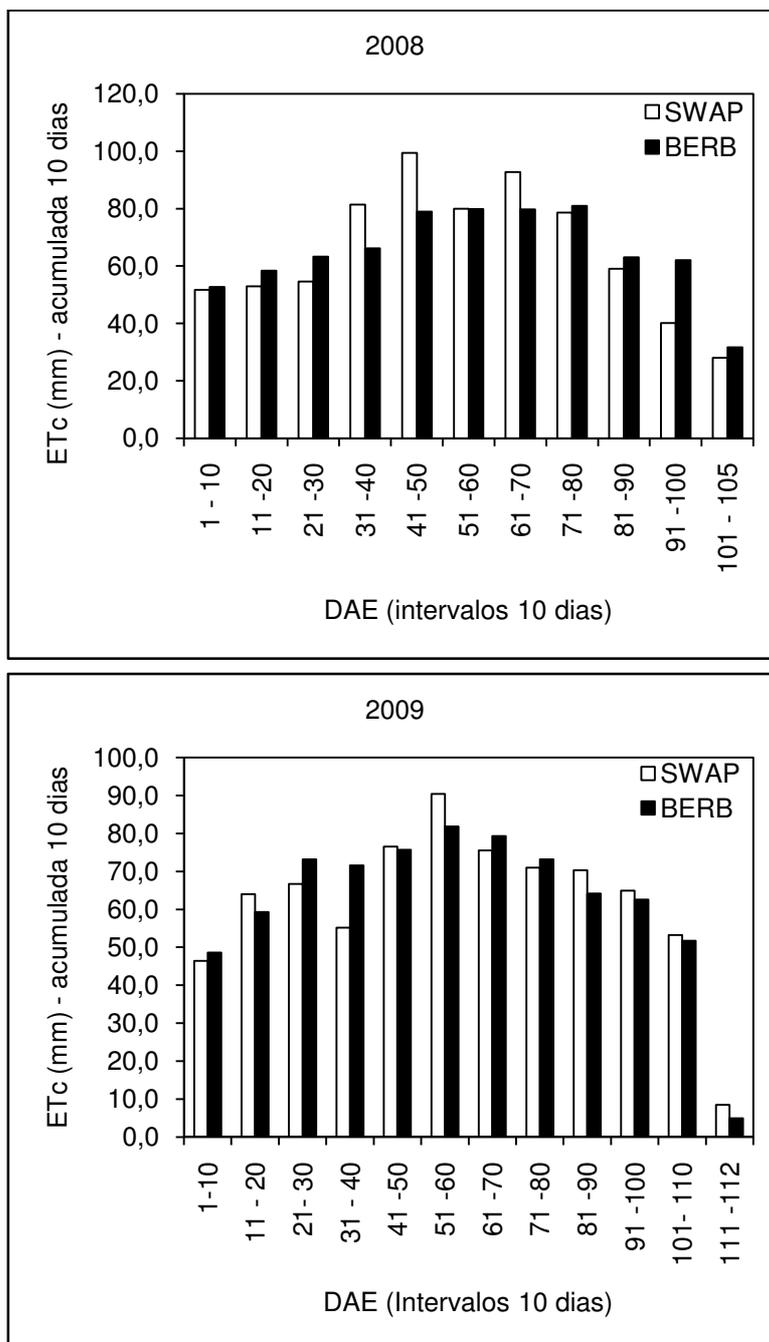


Figura 4.6: Valores da ETc acumulada 10 dias obtida pela técnica de BERB e simulada pelo SWAP no dois anos estudados

Diferenças nessa magnitude estão dentro da faixa de erro oriundas de precisões instrumentais. Verifica-se ainda que há uma forte correlação entre os referidos valores, uma vez que o coeficiente de correlação de Pearson encontrado foi de 0,93 em 2008 e 0,81 em 2009, conforme apresenta a Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Análise estatística da diferença entre a ETc do algodoeiro obtida pela técnica de BERB e simulada pelo SWAP nos dois anos estudados

	2008	2009
SWAP (mm)	719	742
BERB (mm)	717	751
EM (mm)	2,0	-8,4
EMP (%)	0,28	1,12
d	0,86	0,89
R	0,93	0,81
c	0,80	0,72
Desempenho do índice c	Muito Bom	Bom
Teste t-Student	0,945	0,711

A exemplo do que ocorreu com a ETc, o ajuste dos valores da produtividade simulados pelo SWAP com os observados em campo, foi bastante similares para os anos estudados, conforme ilustra a Figura 4.7 e a análise estatística apresentada da Tabela 4.9.

Conforme a Tabela 4.9 observa-se que as diferenças alcançadas entre as produtividades simuladas pelo SWAP-WOFOST e observadas em campo

foram irrisórias, ou seja, apresentaram EMP inferior a 0,60%. Esse desempenho é similar aos resultados obtidos por Mandare et al. (2008) na Índia para a cultura do trigo e arroz e Singh et al. (2006a), também na Índia em estudo envolvendo trigo, arroz, mostarda e algodão.

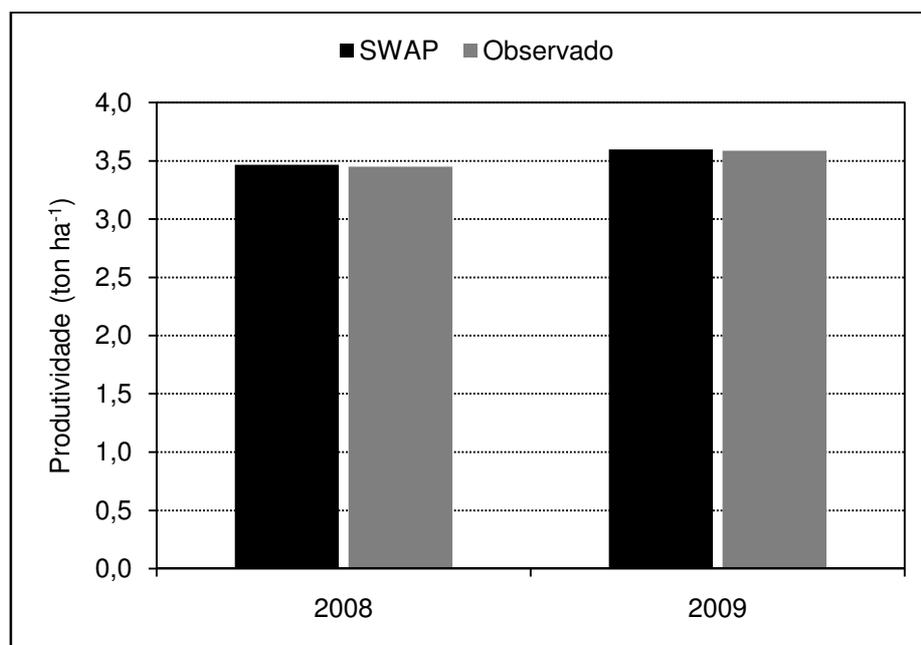


Figura 4.7: Produtividade do algodoeiro simulada pelo SWAP-WOFOST e observada em campo em Apodi-RN nos anos de 2008 e 2009

Tabela 4.9: Análise estatística da diferença entre a produtividade da cultura simulada pelo SWAP e observada em campo

	2008		2009	
	SWAP	Observado	SWAP	Observado
Produtividade (kg ha ⁻¹)	3467	3448	3597	3586
EM (kg ha ⁻¹)		19,0		11,0
EMP (%)		0,55		0,31

No gráfico da Figura 4.8, estão apresentados as respectivas curvas do IAF nos dois anos estudos simuladas pelo modelo SWAP-WOFOST e os valores medidos. Analisando visualmente os gráficos da Figura 4.8 constata-se que os ajustes entre os referidos valores foram muito bons, apresentando fortes concordâncias entre os mesmos. Esta constatação é confirmada pela análise estatística apresentada na Tabela 4.10.

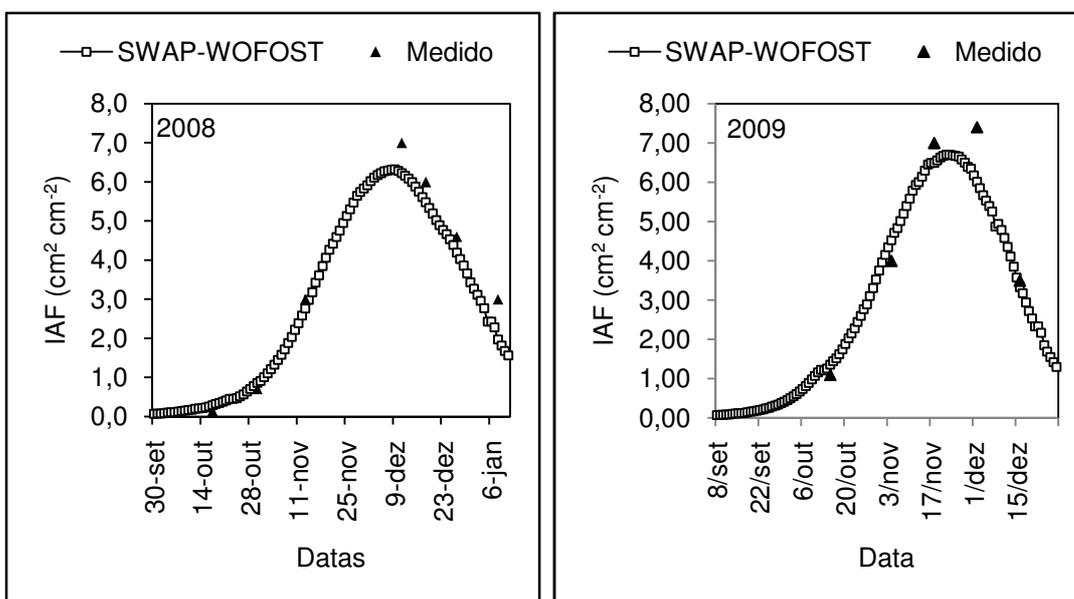


Figura 4.8: Curva do IAF simulada pelo SWAP-WOFOST e valores obtidos em campo

De acordo com o critério do desempenho do índice “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997), o ajuste dos valores do IAF simulados pelo SWAP-WOFOST e obtidos em campo se enquadram como “ótimo”. A forte correlação entre eles é evidenciada pelo coeficiente de Pearson, R, e pelo índice de concordância de Willmott (1982), os quais também estão todos apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Análise estatística da comparação entre IAF medido em campo e simulado pelo SWAP-WOFOST

	R	d	c	Desempenho	Teste t-Student	Valor crítico (P<0,05)
2008	0,99	0,97	0,96	Ótimo	0,87	2,30
2009	0,98	0,93	0,90	Ótimo	0,77	2,18

4.3.3 – Teor de água no solo (θ)

Os gráficos apresentando a comparação entre o teor de água no solo simuladas pelo SWAP durante todo o ciclo fenológico do algodoeiro e os valores observados em campo, nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 60 cm, estão apresentados na Figura 4.9. De acordo com os referidos gráficos observa-se que há forte concordância entre os referidos valores, vez que a maioria dos pontos correspondentes aos valores observados encontra-se sobre a curva correspondente aos valores simulados pelo SWAP.

A forte concordância entre os valores do conteúdo de água no solo simulados e observados é confirmada estatisticamente pelo índice de concordância de Willmott (1982), cujo valor é de 0,93 e pelo índice de confiança c de Camargo Sentelhas (1997) apresentado na Tabela 4.11. O valor do c indica uma concordância classificada com “muito bom”, conforme o mencionado critério.

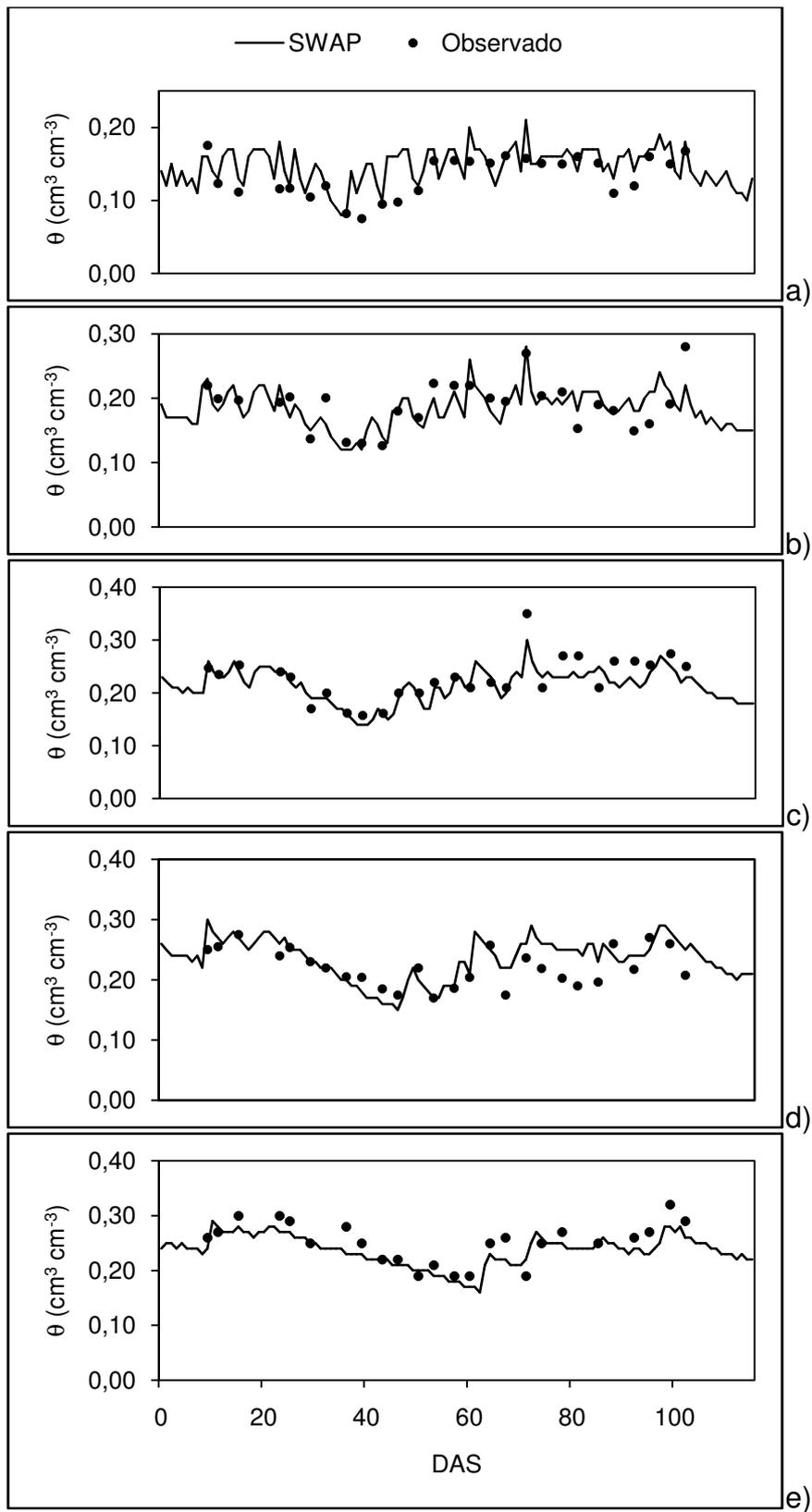


Figura 4.9: Teor de água no solo simulado pelo SWAP e observado em campo através da sonda PR2 em a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm e e) 60 cm

Ainda de acordo com a supracitada Tabela verifica-se que além da forte concordância, há também uma forte correlação entre os resultados, visto que o coeficiente de correlação de Pearson entre os resultados foi de 0,87.

Ainda na Tabela 4.11 está apresentado o valor do teste de t-Student, cujo valor de 0,914 confirma que a diferença entre as médias não é significativa ao nível de significância $P < 0,05$, cujo valor crítico é de 1,97.

Tabela 4.11: Análise estatística da comparação entre teor de água no solo simulado pelo SWAP e observações de campo. O valor crítico do teste t-Student para $p < 0,05$ é igual a 1,97

R	EM (cm³ cm⁻³)	RMSE (cm³ cm⁻³)	d	c	Desemp.	Teste t-Student
0,87	-0,0007	0,0254	0,93	0,82	Muito bom	0,914

Todos os parâmetros estatísticos analisados na presente pesquisa indicam que a diferença entre os resultados do conteúdo de água no solo simulados e observados é similar aos resultados apresentados na literatura. O coeficiente de Pearson de 0,87 (Tabela 4.11) encontra-se dentro da faixa de variação apresentada na validação do SWAP no SMACEX02 em Iowa (EUA) (Ines e Mohanty, 2008). O erro médio (EM), cujo valor em módulo foi de 0,0007 cm³ cm⁻³ conforme a Tabela 4.11, apresenta bastante similaridade com os valores obtidos por Ines e Mohanty (2008) no estados americano do Texas, enquanto que o RMSE de 0,0254 cm³ cm⁻³ se encontra dentro da faixa de variação encontrada por Vazifedoust et al. (2008) no distrito irrigado de Borkhar no Iran. Também apresenta bastante compatibilidade, porém um pouco

superior, aos resultados obtidos por Mandare et al. (2008) no perímetro irrigado na Kaithal, na província de Haryana, na Índia.

4.4 – Tratamento de irrigação – Simulações do SWAP

Nas simulações do efeito de diferentes lâminas de irrigação sobre a produtividade do algodoeiro em Apodi - RN utilizando o modelo SWAP foram consideradas as mesmas datas das aplicações da irrigação. Em ambos os anos estudados o Índice de Área Foliar (IAF) da cultura de cada um dos tratamentos apresentou diferenças consideráveis entre eles, conforme os gráficos das Figuras 4.10a e 4.10b. Nota-se que essas diferenças se tornam claramente evidentes a partir de 40 Dias Após a Emergência, aproximadamente. Comportamentos similares foram observados em outros estudos (Yazar et al., 2002; Howell et al., 2004; Karam et al., 2006; DeTar, 2008; Dağdelen et al., 2009). Os valores máximos do IAF foram observados no tratamento T7-130%, em torno de 7,5 em 2008 e 7,0 em 2009. Esses valores foram atingidos aos 70 DAE, aproximadamente, quando a cultura se encontrava em pleno estágio médio e propiciado a máxima cobertura do solo. Já o T1-40% apresentou os menores valores do IAF, cujos valores máximos atingidos foram de 2,0 e 1,5 em 2008 e 2009, respectivamente.

Segundo Boyer (1976), normalmente a área foliar do algodoeiro e, conseqüentemente o IAF, aumentam com o incremento de umidade no solo. A sensibilidade da área foliar ou do IAF do algodoeiro à lâmina de irrigação já é bastante conhecida na literatura, sendo amplamente discutida em inúmeros estudos (Howell et al., 2004; Karan et al., 2006; DeTar, 2008; Suleiman et al., 2007; Dağdelen et al., 2009), dentre outros.

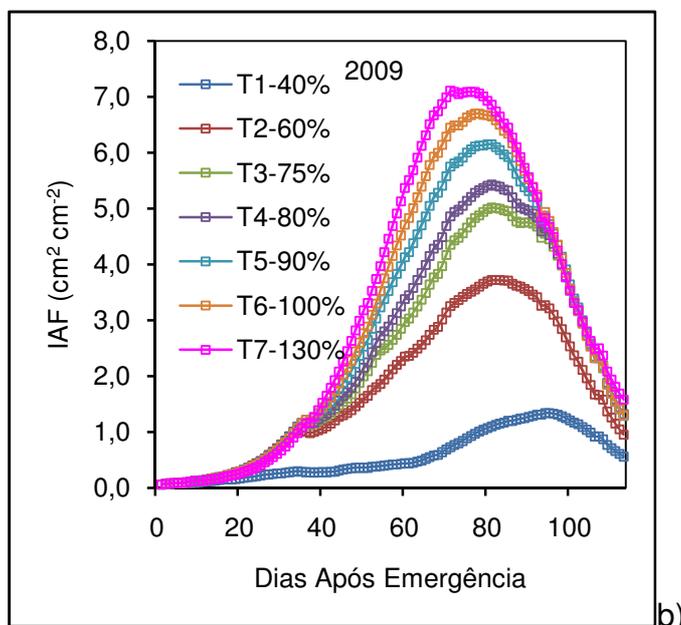
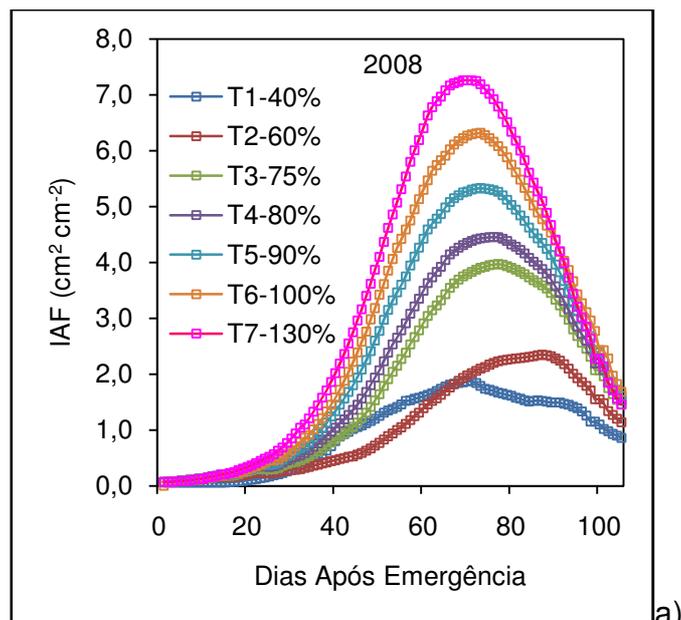


Figura 4.10: Comportamentos do IAF do algodoeiro nos diferentes tratamentos de irrigação, simulados pelo SWAP-WOFOST

A produtividade da cultura do algodoeiro variou de 1332 a 3642 kg ha⁻¹, de acordo com as simulações do SWAP, conforme Tabela 4.12. As respectivas produtividades foram alcançadas nos tratamentos T1-40% no ano de 2008 e no T5-90% em 2009. Ainda na Tabela 4.12 estão apresentados os valores da ETc

de todos os tratamentos, cujos valores variaram de 338 mm no T1-40% no ano de 2008 a 771 mm no T6-100% em 2009.

Tabela 4.12: Produtividade (Prod), lâmina de irrigação (Irr) e evapotranspiração do algodoeiro (ETc) em cada um dos tratamentos de irrigação simulados pelo SWAP-WOFOST em 2008 e 2009

	Prod. (kg ha ⁻¹)		Irr (mm)		ETc (mm)	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009
T1-40%	1332 ^a	1401	357	354	338	352
T2-60%	1977	2357	535	530	462	519
T3-75%	3082	3590	669	663	581	669
T4-80%	3280	3534	714	707	630	683
T5-90%	3487	3642	803	796	664	722
T6-100%	3448	3586	914	884	717	751
T7-130%	3264	3369	1159	1149	750	771

^aAs áreas sombreadas indicam os maiores e os menores valores

Constata-se que o elevado estresse hídrico resultante do déficit de irrigação aplicado aos tratamentos T1-40% e T2-60%, implicou tanto em considerada redução do IAF em relação aos demais tratamentos (Figura 4.10a e 4.10b), como na produtividade da cultura (Tabela 4.12). Nos referidos tratamentos a produtividade foi inferior a 2500 kg ha⁻¹, isto é, apresentou variação de 1332 a 2357 kg ha⁻¹ nos dois anos estudados, conforme a Tabela 4.12. Esses resultados apresentam bastante similaridade com aqueles apresentados pela cultura do algodoeiro submetido a tratamentos de irrigação similares na Índia (Jalota et al., 2006; Thind et al., 2007; Singh et al., 2010b).

A Figura 4.11 mostra as variações temporais dos valores simulados da evapotranspiração relativa ($ET_c ET_{pot}^{-1}$), a qual é definida como a razão entre a ET_c e a evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pot}) (Singh et al., 2010a; Droogers et al., 2010). Observa-se que as referidas curvas evidenciam os efeitos dos diferentes níveis de DI aplicado em cada tratamento. Constatase também que a $ET_c ET_{pot}^{-1}$ varia com a dinâmica de crescimento da cultura e da cobertura do solo. O valor máximo foi atingido por quase todos os tratamentos, exceto o T1-40%, T2-60% e T3-75%, no estágio médio.

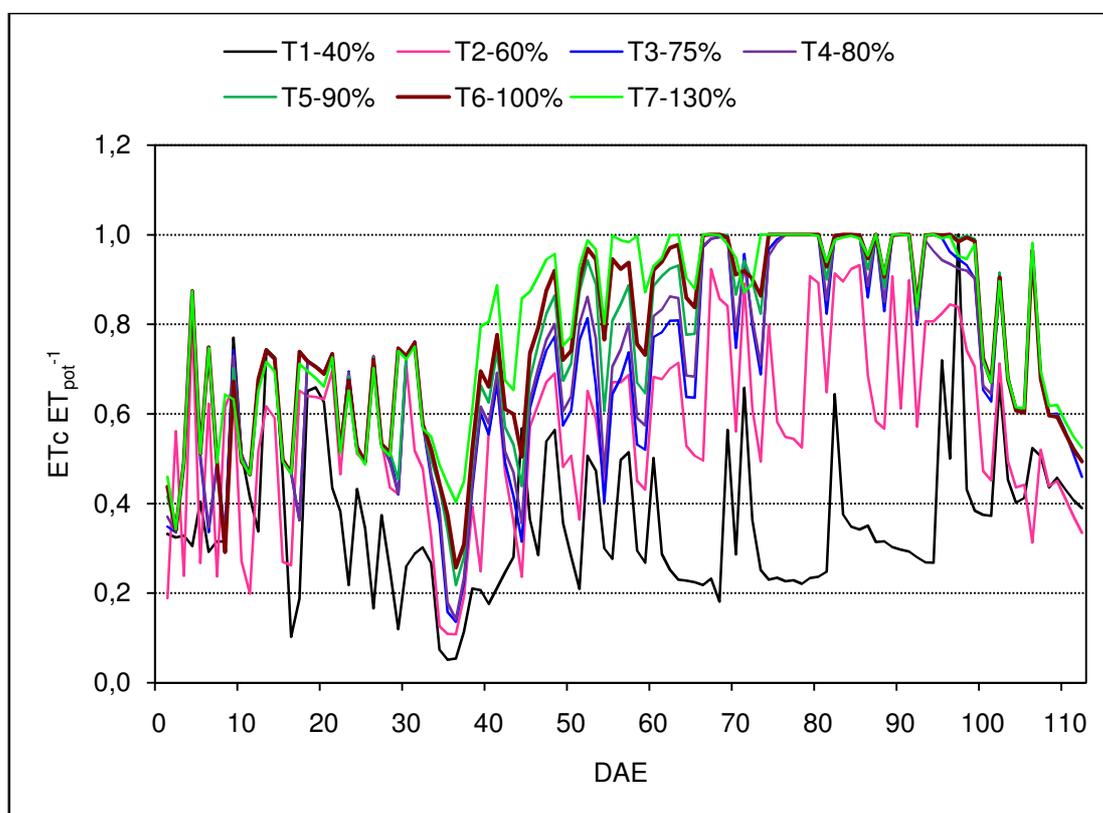


Figura 4.11: Evolução temporal da evapotranspiração relativa ($ET_c ET_{pot}^{-1}$) da cultura do algodoeiro

A relação entre a produtividade da cultura e a respectiva ET_c média dos anos estudados em cada tratamento com as respectivas lâminas de irrigação estão apresentadas nas Figuras 4.12a e 4.12b. Nas referidas Figuras se

constata que as lâminas de irrigação elaboradas com base no DI, isto é, do T1-40% ao T5-90%, cujos totais variaram de 356 a 800 mm, provocaram incrementos tanto na produtividade como na ETc do algodoeiro, a medida que o DI foi diminuindo. Ainda nas respectivas curvas das Figuras 4.12a e 4.12b é possível observar que há tendência clara e nítida de decréscimo da produtividade com a irrigação completa e excessiva nos tratamentos T6-100% e T7-130%, cujos valores médios foram de 899 e 1154 mm, respectivamente. Em consequência desse comportamento, houve significativa relação quadrática ao nível $P < 0,05$ entre a produtividade e a lâmina de irrigação aplicada, apresentando forte correlação (Figura 4.12b). O comportamento da curva que relaciona a produtividade com a lâmina de irrigação aplicada apresentado nas Figuras 4.12a, assim como a respectiva correlação (Figura 4.12b), apresenta bastante similaridade com os respectivos resultados encontrados em outros estudos envolvendo o algodoeiro na Turquia (Cetin e Bilgel, 2002), na Índia (Jalota et al., 2006), no Líbano (Karam et al., 2006) e no estado americano da Califórnia (DeTar, 2008).

Observa-se ainda na Figura 4.12a que houve uma consonância entre as curvas que relacionam a ETc com a lâmina de irrigação aplicada e a produtividade da cultura também com a lâmina de irrigação aplicada nos tratamentos baseados no DI. A partir do T6-10%, lâmina de irrigação completa e igual 899 mm, acontece uma dissociação das referidas curvas, uma vez que a ETc continua tendo incrementos no seu valor nos tratamentos T6-100% e T7-130%, enquanto que a produtividade apresenta tendência de decréscimo nessas condições, conforme já comentado anteriormente.

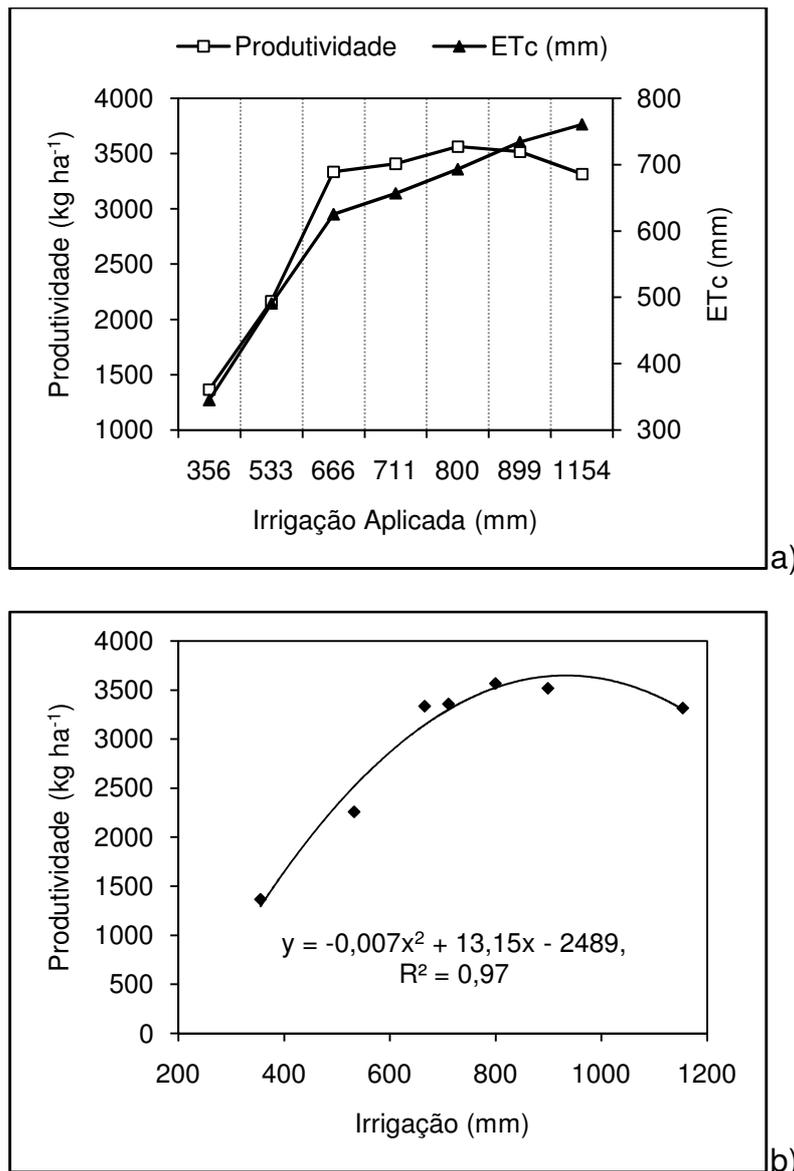


Figura 4.12: (a) Relação entre os valores médios da ETc e da produtividade do algodoeiro com a irrigação aplicada e (b) relaciona a produtividade em função da lamina de irrigação

O comportamento das referidas curvas da Figura 4.12a, de acordo com Fereres e Soriano (2007), é uma das várias razões que norteiam a adoção do DI como prática de manejo de irrigação visando o uso mais eficiente da água na irrigação, principalmente em regiões áridas e semiáridas, onde esse recurso é escasso e a irrigação é um fator preponderante para produção agrícola.

A tendência de decréscimo da produtividade do algodoeiro quando submetido à lâminas de irrigação abundantes ou excessivas já fora observada por Bange e Milroy (2000), que atribuem esse comportamento ao maior crescimento vegetativo da cultura submetida a essas condições. Na presente pesquisa o mais expressivo crescimento vegetativo da cultura submetida à irrigação abundante é confirmada pela maior expansão foliar alcançada pela cultura submetida aos tratamentos T6-100% e T7-130%, evidenciado pelas respectivas curvas do IAF apresentadas nos anos de 2008 e 2009 nas Figuras 4.10a e 4.10b. Ainda de acordo com Bange e Milroy (2000) em consequência do mais expressivo crescimento vegetativo, ocorre redução no número total de capulhos produzidos por plantas. Essa redução do número dos capulhos acontece por ocasião do aumento de competitividade pelos assimilados disponíveis (Guinn et al., 1981). Esse decréscimo ainda pode ser atribuído ao comprometimento da produtividade da cultura devido ao surgimento de doenças e nematóides nas raízes da planta em função do excesso de umidade do solo na zona radicular.

O fator resposta à produtividade (k_y) do algodoeiro em Apodi-RN foi determinado com os dados oriundos de ambas as campanhas experimentais utilizando o métodos de Stewart et al. (1977). O rendimento relativo ($1 - Prod/Prod_m$) decresceu linearmente com o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_c/ET_m$) (Figura 4.13). Quando os dados de ambos os anos foram combinados, o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,88; a relação foi estatisticamente significativa ao nível de $P < 0,01$; o fator de resposta à produtividade do algodoeiro (k_y) foi de 1,01. Este valor foi consideravelmente superior ao de 0,85, proposto por Doorenbos e Kassam (1979) e aos valores

de 0,78 (Dağdelen et al., 2009), 0,89 (Yazar et al., 2002) e 0,92 (Dağdelen et al., 2006). Por outro lado, é bastante inferior aos valores de 1,11 e 1,24 obtidos por Horst et al. (2007) e DeTar (2008), respectivamente. No entanto, Pereira et al. (2009) atribuem a essas discrepâncias as diferentes sensibilidades ao estresse hídrico apresentada por cada cultivar. Doorenbos e Kassam (1979) ainda enfatizam a influência das condições climáticas de cada local.

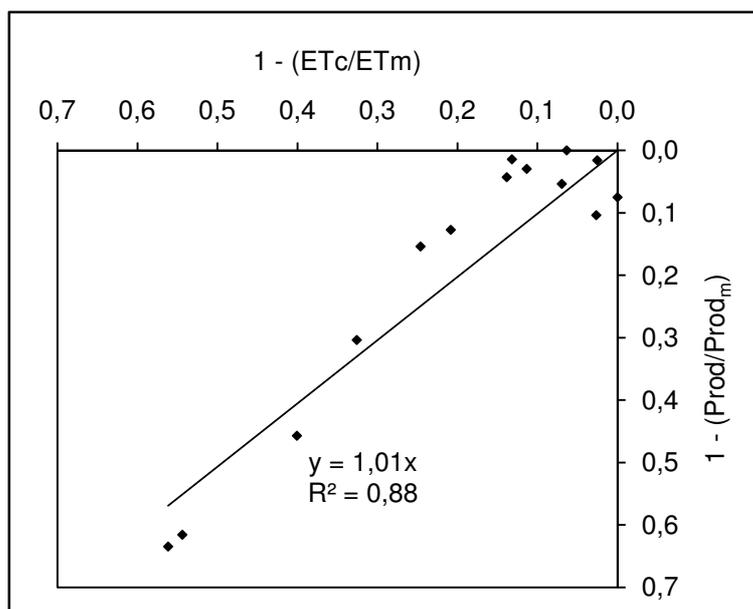


Figura 4.13: Fator resposta da cultura do algodão ao estresse hídrico

Os respectivos desempenhos apresentados pela irrigação em cada um dos tratamentos considerados neste estudo estão apresentados na Tabela 4.13. A EUA_{ET} dos dois anos estudados variou de 0,39 a 0,54 $kg\ m^{-3}$. O desempenho mais modesto foi observado no T1-40%, enquanto que o melhor desempenho foi apresentado pelo T3-75%, cujo déficit de irrigação foi 25%. Constatam-se nos dados apresentado na Tabela 4.13 que nos tratamento T1-40%, T2-60% e T3-75% houve sucessivos incrementos nos valores da EUA_{ET} . A partir do T3-75%, cujo desempenho foi o melhor apresentado na presente

pesquisa (Tabela 4.13), até o T7-130%, os valores da EUA_{ET} reduziram a medida que houve incremento na lâmina de irrigação aplicada. Comportamentos similares foram detectados por Ibragimov et al. (2007), Dağdelen et al. (2009) e Singh et al. (2010b).

Tabela 4.13: Eficiência de Uso da Água obtida em termos da evapotranspiração (EUA_{ET}) e da irrigação (EUA_{Irr}) em cada tratamento simulados pelo SWAP-WOFOST nos dois anos estudados

	EUA_{ET} (kg m ⁻³)			EUA_{Irr} (kg m ⁻³)		
	2008	2009	Média	2008	2009	Média
T1-40%	0,39	0,40	0,40	0,37	0,40	0,39
T2-60%	0,43	0,45	0,44	0,37	0,44	0,41
T3-75%	0,53	0,54	0,54	0,46	0,54	0,50
T4-80%	0,52	0,52	0,52	0,45	0,50	0,48
T5-90%	0,53	0,50	0,52	0,43	0,46	0,45
T6-100%	0,48	0,48	0,48	0,38	0,41	0,40
T7-130%	0,44	0,44	0,44	0,28	0,29	0,29

É notado na Tabela 4.13 que a EUA_{ET} foi sempre superior à EUA_{Irr} . Entretanto, estudos realizados em outras regiões do planeta produtoras de algodão têm mostrado que esse comportamento tem sido inverso, a exemplo de Yazar et al. (2002), Jalota et al. (2006), Dağdelen et al. (2006; 2009), Ibragimov et al. (2007) e Singh et al. (2010b). Esse comportamento diferenciado acontece porque em todos os estudos supracitados a cultura complementou o seu consumo hídrico com águas extraídas do subsolo por ascensão capilar. No Semiárido do Brasil tem sido mostrado que o consumo

hídrico das culturas, invariavelmente, tem sido restrito à irrigação (Azevedo et al., 2003; 2007; Silva et al., 2007; Bezerra et al., 2010). Constata-se na Figura 4.14, que à medida que a lâmina de irrigação é acrescida, as curvas de tendência da EUA_{ET} e da EUA_{irr} se distanciam. Esse distanciamento acontece porque à medida que se incrementa água por meio da irrigação, aumenta-se o volume de água que é perdido por percolação, ou em outras palavras, diminui o percentual da água aplicada via irrigação que é utilizada pela planta no processo de evapotranspiração. Além do mais com solo saturado as raízes das plantas não conseguem respirar, além de surgirem doenças em decorrência do excesso de umidade. Constata-se claramente na Figura 4.14, que do T1-40% ao T3-75%, lâmina de irrigação em torno de 350 mm a aproximadamente a 650 mm, que tanto a EUA_{ET} como a EUA_{irr} sofreram incrementos.

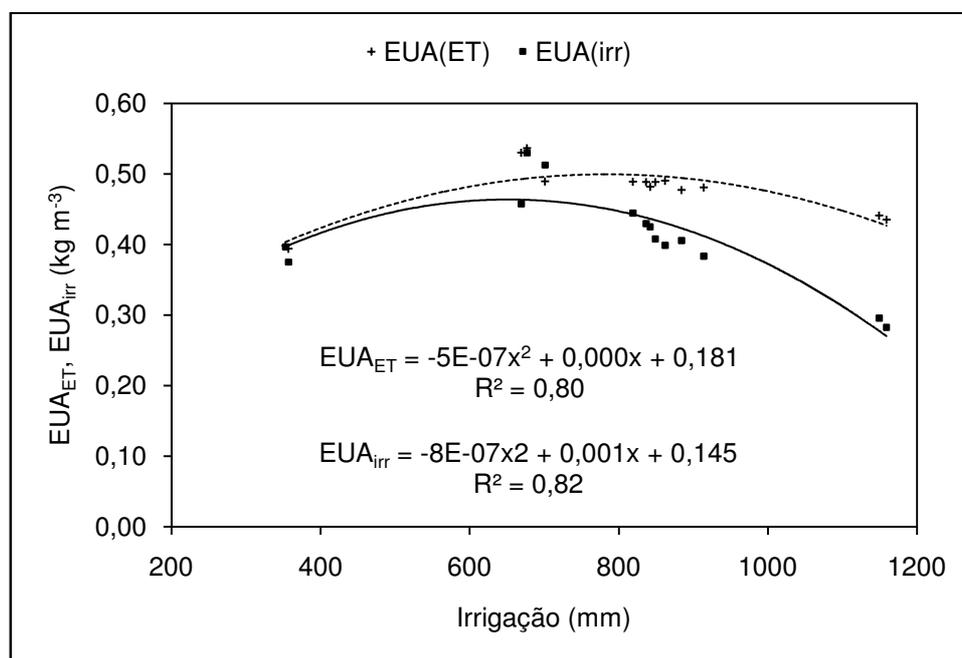


Figura 4.14: Relação entre os valores da EUA_{ET} e da EUA_{irr} com a lâmina de irrigação aplicada em cada tratamento

Por outro lado, a partir de 650 mm (T3-75%) o incremento na lâmina de irrigação provocou queda dos valores dos respectivos indicadores. Esse

comportamento permitiu o ajuste a uma relação quadrática significativa ao nível $P < 0,01$ entre os referidos indicadores e as lâminas de irrigação.

As referidas perdas são apresentadas nos gráficos da Figura 4.15, que apresentam a variação temporal dos fluxos de água em duas profundidades, 70 cm e 100 cm. O fluxo de água positivo indica ascensão da água ou fluxo de água das camadas mais profundas em direção à superfície por ascensão capilar, que acontece devido à extração de água pelo sistema radicular das plantas ou devido à secagem das camadas superiores do solo. O fluxo negativo, por sua vez, representa o fluxo de água das camadas superficiais para as camadas mais profundas do solo. No entanto, vale a pena lembrar que não houve dados medidos com os quais os fluxos de água simulados pudessem ser comparados.

Observa-se, no entanto, que à medida que se aumenta a lâmina de irrigação, mantendo-se fixo o turno de rega da irrigação, aumenta-se o fluxo para as camadas mais profundas do solo. Nos tratamentos baseados no DI, do T1-40% ao T5-90% os fluxos máximos diários foram inferiores a $-4,0 \text{ cm d}^{-1}$, No T6-100% os fluxos máximos a 70 e a 100 cm de profundidade foram de aproximadamente -5 e -10 cm , respectivamente. Já no T7-130% os fluxos de água nas referidas profundidades foram superiores a 10 cm d^{-1} .

É possível constatar ainda que houve fluxos de água por ascensão capilar do T1-40% ao T6-100%, porém todos muito pequenos e inferiores a 2 cm d^{-1} . No T7-130%, entretanto, não houve fluxo por ascensão capilar em nenhum dia ao longo do ciclo do algodoeiro. O aumento das perdas de água com aumento da irrigação evidenciado nos gráficos da Figura 4.15, causou a

dissociação das curvas da produtividade e da ETC em relação a irrigação aplicada (Figura 4.12).

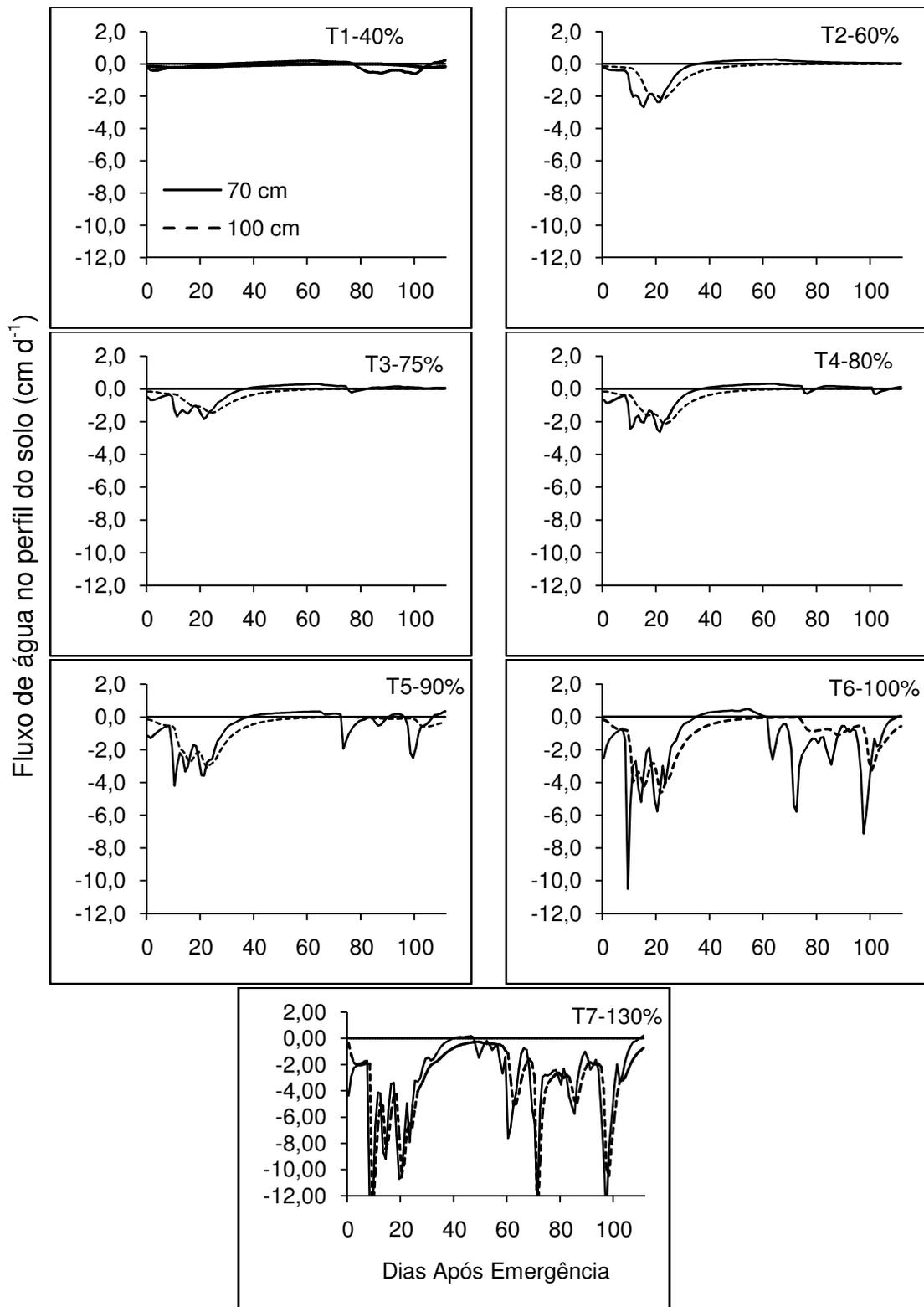


Figura 4.15: Variação temporal do fluxo de água em diferentes profundidades do perfil do solo em cada tratamento estudado, simulados pelo SWAP

Entretanto, a depender do tipo de solo, Perry et al. (2009) não caracterizam a água percolada como perdas do ponto de vista hidrológico, visto que a mesma retorna ao sistema de armazenamento no subsolo, porém do ponto de vista econômico, agrometeorológico e agrônômico a mesma pode ser encarada como tal, uma vez que representa incrementos nos custos de produção, visto que foi demandada considerável quantidade de energia no processo de bombeamento para superfície. Também deve ser levado em consideração, que as perdas de água por fluxos para as camadas mais profundas provocam lixiviação de agroquímicos, que causam tanto prejuízos financeiros ao produtor como nutricionais às plantas, além de eventuais impactos ambientais como a contaminação das águas de subsolo (Resende e Albuquerque, 2002; Bernardo et al., 2008).

Comparando com os resultados constantes na literatura internacional (Tabela 4.14), constata-se que a faixa de variação da EUA_{ET} apresentada na presente pesquisa foi superior aos valores encontrados por Saranga et al, (1998) em Israel e Singh et al. (2010b) na Índia. O melhor desempenho apresentado pelo tratamento T3-75%, cujo valor médio da EUA_{ET} é de $0,54 \text{ kg m}^{-3}$, se encontra dentro da faixa de variação encontrada por Yazar et al. (2002), Jalota et al. (2006) e Tang et al. (2010). Por outro lado é bem inferior aos valores observados por Dağdelen et al. (2006; 2009) e Ibragimov et al. (2007).

A faixa de variação da EUA_{Irr} , em geral é bastante inferior aos valores constantes na literatura internacional e apresentados na Tabela 4.14. As razões, conforme já discutidas anteriormente, é que a cultura nesses estudos completou o seu consumo hídrico com águas de subsolo, ou pelo sistema de

irrigação. A irrigação nesse caso é complementar, embora corresponda a porções superiores a 70% da ETc.

Tabela 4.14: Comparação dos valores da EUA_{ET} e da EUA_{Irr} com outros estudos

Fonte	Sistema de irrigação	EUA_{ET} (kg m⁻³)	EUA_{Irr} (kg m⁻³)
Neste estudo	Aspersão	0,39 – 0,54	0,28 – 0,54
Saranga et al. (1998)	Sulco	0,22 – 0,35	-
Kanber et al. (1996)	Sulco	-	0,15 – 0,51
Yazar et al. (2002) ^a	LEPA	0,55 – 0,68	0,58 – 0,78
Yazar et al. (2002)	Gotejamento	0,50 – 0,74	0,60 - 0,81
Dağdelen et al. (2006)	Sulco	0,61 – 0,72	0,77 – 1,40
Karam et al. (2006)	Gotejamento	0,80 – 1,30	-
Jalota et al. (2006)	Inundação	0,26 – 0,31	0,25 – 0,87
Ibragimov et al. (2007)	Gotejamento	0,63 – 0,88	0,82 – 1,12
Ibragimov et al. (2007)	Sulco	0,46 – 0,50	0,55 – 0,62
Ünlü et al. (2007)	Sulco	0,19 – 0,53	0,11 – 0,81
Du et al. (2008)	Gotejamento	0,52 – 0,79	1,07 – 1,51
Dağdelen et al. (2009)	Gotejamento	0,77 – 0,96	0,82 – 1,44
Singh et al. (2010b)	Gotejamento	0,39 – 0,42	0,54 – 0,65
Tang et al. (2010)	Sulco	0,54 – 0,76	-

^a A área sombreada denota os estudos que apresentaram melhor EUA_{ET}

O desempenho mais modesto apresentado pela irrigação na presente pesquisa em relação a maioria dos estudos internacionais apresentados na Tabela 4.14 em grande parte deveu-se as perdas por percolação, conforme já

discutido anteriormente. Porém, outro fator que pode ter influenciado diretamente foi o sistema de irrigação utilizado. Nota-se na Tabela 4.14 que em todos os estudos que apresentaram EUA_{ET} superior aos resultados encontrados na presente pesquisa o algodoeiro foi irrigado por sistemas de irrigação localizado (gotejamento), com exceção de Dağdelen et al. (2006) e Tang et al. (2010) que em cujos estudos utilizaram o sistema de sulco. Embora que dependendo da configuração do planejamento e instalação de irrigação, o mesmo pode ser considerado localizado. Istanbulluoglu (1989), Kanber et al. (1997) e Cetin e Bilgel (2002) também constataram que a EUA_{ET} do algodoeiro irrigado com aspersão foi inferior aos respectivos resultados apresentados pela cultura quando irrigada por sistema de irrigação localizada. Cetin e Bilgel (2002) constataram que a redução da EUA_{ET} da cultura irrigada por aspersão foi de aproximadamente 30% em relação à cultura irrigada por gotejamento e de 13% em relação ao desempenho da irrigação por sistema de sulco.

De acordo com a literatura, dentre as razões pelas quais o sistema de irrigação por aspersão tem apresentado eficiência inferior é que este sistema tem interferido diretamente na produtividade cultura. De acordo com os resultados de Cetin e Bilgel (2002) a produtividade do algodoeiro irrigado por aspersão foi em média 30% inferior ao irrigado por gotejamento e 8% inferior ao irrigado por sulco. Esta redução pode está associada às condições microclimáticas criadas, uma vez que as variáveis meteorológicas no interior do campo irrigado por aspersão são diretamente afetadas e também a tensão de umidade do solo (Cavero et al., 2009; Sawan et al., 2010). Cetin e Bilgel (2002) ainda apontam a considerada queda das flores por ocasião do impacto do jato de água provindo do aspersor com as mesmas.

Outra razão elencada na literatura como provável causa da EUA_{ET} apresentada por culturas irrigadas por aspersão terem sido mais baixas que aquelas apresentadas por culturas irrigadas por outros sistemas, estão associadas ao fato do sistema de irrigação por aspersão provocar um incremento considerável no valor da ET_c . O sistema de irrigação por aspersão provoca intenso molhamento da superfície incluindo a faixa de solo exposto entre as fileiras. Assim, a ET_c é acrescida dos valores resultantes da evaporação da umidade do solo exposto entre as fileiras, principalmente nos estágios inicial e de desenvolvimento da cultura, quando a mesma não tem propiciado plena cobertura vegetal do solo (López-Urrea et al., 2009). Além da evaporação da umidade do solo exposto Cavero et al. (2009) ainda acrescentam a evaporação da água interceptada pelo dossel da cultura como uma componente a mais que é adicionada à ET_c . Nos sistemas de irrigação localizada, especificamente o sistema de gotejamento, a evaporação da faixa de solo exposto entre as fileiras e da água interceptada pelo dossel é nula e a evapotranspiração da cultura se restringe praticamente ao processo de transpiração das plantas.

Na Tabela 4.15 estão apresentadas as faixas de variação da produtividade apresentadas pelo algodoeiro em Apodi-RN e em alguns outros estudos realizados em regiões produtoras de algodão. Nota-se que todos os estudos que utilizaram o sistema de irrigação por gotejamento apresentaram produtividade superior a obtida na presente pesquisa, com exceção de Du et al. (2008).

Tabela 4.15: Comparação entre a produtividade do algodoeiro obtida em Apodi-RN com outros estudos

Fonte	Número de tratamentos	Sistema de irrigação	Produtividade (kg ha⁻¹)
Nesse estudo	7	Aspersão	1332 – 3642
Yazar et al. (2002) ^a	10	Gotejamento	2310 – 5870
Yazar et al. (2002)	4	LEPA	2590 - 4750
Jalota et al. (2006)	3	Inundação	1513 - 2187
Dağdelen et al. (2006)	5	Gotejamento	1740 – 5640
Ünlü et al. (2007)	4	Sulco	2130 - 3780
Ibraginov et al. (2007)	3	Gotejamento	3180 - 4030
Ibragimov et al. (2007)	1	Sulco	3180 - 3660
Du et al. (2008)	6	Gotejamento	1848 – 2781
Değdelen et al. (2009)	4	Gotejamento	2550 – 5760
Singh et al. (2010b)	6	Sulco	2058 - 3237
Tang et al. (2010)	3	Sulco	3209 - 4073

^a A área sombreada denota os que apresentaram maior produtividade

No entanto, a mais baixa produtividade do algodoeiro da presente pesquisa em relação aos demais estudos listados na Tabela 4.15 também possivelmente pode está diretamente associada a cultivar utilizada e não somente ao sistema de irrigação.

5.0 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

De acordo com os resultados apresentados e discutidos conclui-se que:

1. A demanda hídrica da atmosfera local observada durante os respectivos períodos experimentais foi considerada elevada conforme atestam os valores médios da ET_0 ;
2. Em consequência da elevada demanda hídrica da atmosfera local, o consumo hídrico da cultura do algodoeiro em Apodi – RN foi considerado elevado em comparação com outras áreas do Semiárido brasileiro, a exemplo das várzeas de Sousa e do sul do estado do Ceará;
3. O K_{c-ini} foi o mais suscetível às variações da lâmina de irrigação aplicada;
4. O desempenho do modelo SWAP-WOFOST, de acordo com os testes estatísticos aplicados, foi considerado satisfatório, apresentando confiabilidade suficiente para sua aplicação;
5. Dos parâmetros de VGM, os que apresentaram maior sensibilidade na obtenção da transpiração das plantas foram o K_{sat} e o n , enquanto os

- menos sensível foram θ_{sat} e θ_{res} ; assim, se for feita calibração através da otimização dos parâmetros, o k_{sat} e o n devem ser sempre priorizados;
6. Os indicadores de desempenho da irrigação utilizados nesta pesquisa, EUA_{ET} e EUA_{irr} , apresentaram incrementos nos seus valores do T1-40% ao T3-75%; a partir desse tratamento sofreram sucessivos decréscimos em seus valores a medida que se incrementou água na lâmina de irrigação;
 7. De todas as opções de manejo avaliadas nas simulações do SWAP a que apresentou o melhor desempenho de acordo com o critério de maior EUA_{ET} foi o tratamento T3-75%, sendo esse o manejo então recomendado;
 8. É muito importante que estudos dessa natureza sejam conduzidos utilizando outras cultivares.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of Hydrology**, v.229, p.27-41, 2000.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M., FAO Irrigation and Drainage Paper Nº 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computation crop water requirements. Rome. Italy. 300p., 1998.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007a.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.395-406, 2007b.

ANAÇ, S.; UL, M. A.; TUZEL, I. H.; ANAÇ, D.; OKUR, B.; HAKERLER, H. **Optimum irrigation scheduling for cotton under deficit irrigation conditions**. In: KIRDA, C.; MOUTONNET, P.; HERA, C.; NIELSEN, D. R. (Eds.). **Crop Yield Response to Deficit Irrigations**. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. The Netherlands. 1999.

ANURAGA, T. S.; RUIZ, L.; KUMAR, M. S. M.; SEKHAR, M.; LEIJNSE, A. Estimating groundwater recharge using land use and soil data: A case study in South India. **Agriculture Water Management**, v.84, p.65-76, 2006.

AZEVEDO, P. V.; RAO, T. V. R.; AMORIM NETO, M. S.; BEZERRA, J. R. C.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MACIEL, G. F. Necessidades hídricas da cultura do algodoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 7, p. 863 – 870, 1993.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchard in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v.58, p.241-254, 2003.

AZEVEDO, P. V.; SOUZA, C. B.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment. Brazil. **Agricultural Water Management**, v.88, p.201-208, 2007.

BANGE, M. P.; MILROY, S. P. Timing of crop maturity in cotton impact of dry matter production and partitioning. **Field Crops Research**, v.68, p.143-155, 2000.

BARROS, A. H. C. Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico. 148f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba-SP, 2010.

BASHIR, M. A.; HATA, T.; TANAKAMARU, A. W.; TADA, A. Satellite-based energy balance model to estimate seasonal evapotranspiration for irrigated sorghum: a case study from the Gezira scheme. Sudan. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.12, p.1129-1139, 2008.

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL – Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin. Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p.87–100, 2000.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, n.1, p.85-92, 2005.

BAUMHARDT, R. L.; STAGGENBORG, S. A.; GOWDA, P. H.; COLAIZZI, P. D.; HOWELL, T. A. Modeling irrigation management strategies to maximize cotton lint yield and water use efficiency. **Agronomy Journal**, v.101, n.3, p.460-468, 2009.

BELMANS, C.; WESSELING, J. G.; FEDDES, R. A. Simulation model of the water balance of a cropped soil. **Journal of Hydrology**, v.63, p.271-286, 1983.

BELTRÃO, N. E. M.; AMORIM NETO, M. S.; LIMA, R. L. S.; LEÃO, A. B.; ALBUQUERQUE, W. G.; CAROSO, G. D. **Zoneamento do algodão herbáceo no Nordeste**. In.: BELTRÃO, N. E. M; AZEVEDO, D. M. P. (Editores). **O Agronegócio do algodão no Brasil**. v.1, 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008, cap.4. p.111-127.

BELTRÃO, N. E. M. Breve história do algodão no Nordeste do Brasil. EMBRAPA-Algodão: Documento 117, Campina Grande, 2003.

BEN-ASHER, J.; VAN DAM, J.; FEDDES, R. A.; JHORAR, R. K.; Irrigation of grapevines with saline water II. Mathematical simulation of vine growth and yield. **Agriculture Water Mangement**, v.83, p.22-29, 2006.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8.ed. Viçosa: Editora da UFV, 2008. 625p.

BEZERRA, J. R. C.; AZEVEDO, P. V.; DIAS, J. M.; SILVA, B. B.; LUZ, M. J. S. Efeito dalâmina de irrigação na rentabilidade do algodoeiro BRS 200 – Marrom. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v.12, n.3, p.97-106, 2008a.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM – Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p.171-183, 2008b.

BEZERRA, J. R. C.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; DIAS, J. M. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS-200 Marrom. Irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.14, n.6, p.625-632, 2010.

BLACK, T. A.; GARDNER, W. R.; THERTELL, G. W. The prediction of evaporation drainage and soil water storage from a bare soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.33, p.655-660, 1969.

BLAD, B. L.; ROSENBERG, N. J. Lysimetric calibration of the Bowen Ratio-Energy Balance method for evapotranspiration estimation in the Central Great Plains. **Journal of Applied Meteorology**, v.13, p.227-236, 1974.

BOLDT, A. L.; EISENHAUER, D. E.; MARTIN, D. L.; WILMES, G. J. (1999). Water conservation practices for a river valley irrigated with groundwater. **Agricultural Water Management**, v.38, p.235-256, 1999.

BORGES, C. J. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; CAMPOS, J. H. C.; MOURA, M. S. B.; J. M. SILVA, B. B. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.14, p.393-399, 2008.

BOYER, J. S. **Water deficits and photosynthesis**. In: KOZLOWSKI, T. T. (ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1976. p. 153-190, 4 v.

BURKE, J. J.; WANJURA, D. F. **Plant responses to temperature extremes**. In.: STEWART, J. McD.; OOSTERHUIS, D. M.; HEITHOLT, J. J.; MAUNEY, J. R. (Editors). **Physiology of Cotton**. New York: Springer. 2010, cap.12, p.123-128.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.

CAVERO, J.; MEDINA, E. T.; PUIG, M.; MARTÍNEZ-COB, A. Sprinkler irrigation changes maize canopy microclimate and crop water status, transpiration, and temperature. **Agronomy Journal**, v.101, p.854-864, 2009.

CETIN, O.; BILGEL, L. Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton. **Agricultural Water Management**, v.54, p.1-15, 2002.

CHRISTOFIDIS, D. Água: gênese e sustentabilidade alimentar no Brasil. PROÁGUA: Brasília, 2006.

CRESCIMANNO, G.; GAROFALO, P.; Management of irrigation with saline water in cracking clay soils. **Soil Science Society of America**, v.70, p.1774-1787, 2006.

CRUCIANI, D. E. **A Drenagem na Agricultura**. 4.ed, São Paulo: Livraria Nobel, 1987.

DAAS, N. N.; MOHANTY, B. P.; COSH, M. H.; JACKSON, T. J. Modeling and assimilation of root zone soil moisture using remote sensing observations in Walnut Gulch Watershed during SMEX04. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.415-429, 2008.

DACOSTA, M.; HUANG, B. Deficit irrigation on water use characteristics of bentgrass species. **Crop Science**, v.46, p.1779-1786, 2006.

DAĞDELEN, N.; BAŞAL, H.; YILMAZ, E.; GÜRBÜZ, T.; AKÇAY, S. Different drip irrigation regimes affect cotton yield, water use efficiency and fiber quality in western Turkey. **Agricultural Water Management**, v.96, n.1, p.111-120, 2009.

DAĞDELEN, N.; YILMAZ, E.; SEZGIN, F.; GÜRBÜZ, T. Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey. **Agricultural Water Management**, v.82, p.63-85, 2006.

DETAR, W. R. Yield and growth characteristics for cotton under various irrigation regimes on sandy soil. **Agricultural Water Management**, v.95, p.69-76, 2008.

DOHERTY, J. PEST: Model Independent Parameter Estimation. Fifth edition of user manual. Watermark Numerical computing. Brisbane, 2005.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. Yield response to water. Report n.33. FAO: Rome, 1979.

DORIJ, M. Integration of SWAP model and SEBAL algorithm for evaluation of on-farm irrigation scheduling with minimum field data. Thesis (Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation). 51f. International Institute for Geo-information Science and earth Observation, Enschede, The Netherlands, 2003.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC. version 2.00). **Scientia Agrícola**, v.57, n.1, p.191-196, 2000.

DROOGERS, P.; IMMERZEEL, W. W.; LORITE, I. J. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. **Agricultural Water Management**, v.97, p.1351-1359, 2010.

DROOGERS, P.; VAN LOON, A.; IMMERZEL, W. W. Quantifying the impact of model inaccuracy in climate change impact assessment studies using an agro-hydrological model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.12, p.669-678, 2008.

DU, T.; KANG, S.; ZHANG, J.; LI, F. Water use and yield responses of cotton to alternate partial root-zone drip irrigation in the arid area of north-west China. **Irrigation Science**, v.26, p.147-159, 2008.

EITZINGER, J.; TRNKA, M.; HÖSCH, J.; ZALUD, Z.; DUBROVSKY, M. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulations soil water content during season under different soil conditions. **Ecological Modeling**, v.171, p.223-246, 2004.

ENGLISH, M.; RAJA, S. N. Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v.32, p.1-14, 1996.

ESPARZA, A. M.; GOWDA, P. H.; BAUMHARDT, R. L.; MAREK, T. H.; HOWELL, T. A. Heat unit availability for cotton production in the Ogallala Aquifer Region of the United States. **Journal of Cotton Science**, v.11, p.110-117, 2007.

FAN, T.; STEWART, B. A.; PAYNE, W. A.; WANG, Y.; SONG, S.; LUO, J.; ROBINSON, C. A. Supplemental irrigation and water: yield relationships for plasticulture crops in the loess plateau of China. **Agronomy Journal**, v.97, p.177-188, 2005.

FARAHANI, H. J.; OWEIS, T. Y.; IZZI, G. Crop coefficient for drip-irrigated cotton in a Mediterranean environment. **Irrigation Science**, v. 26, p.275-383, 2008.

FEDDES, R. A. Water, heat and crop growth. Tese (Ph.D). Wageningen University, The Netherlands, 1971.

FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J.; ZARADNY, H. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen, The Netherlands, 1978.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147-159, 2007.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de cafeeiros em fase de formação. **Bragantia**, v.68, n.1, p.269-278, 2009.

FOLHES, M. T.; RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1398-1408, 2009.

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v.25, n.2. p.127-140, 2007.

GOVINDARAJAN, S.; AMBUJAM, N. K.; KARUNAKARAN, K. Estimation of paddy water productivity (WP) using hydrological model: an experimental study. **Paddy Water Environmental**, v.6, p.327-339, 2008.

GRISMER, M. E. Regional cotton lint yield. ETc. and water value in Arizona and California. **Agricultural Water Management**, v.54, n.3, p.227–242, 2002.

GUERRA, H. O. C. **Física dos Solos**. 2.ed., Campina Grande: Editora Universitária, 2004.

GUINN, G.; MAUNEY, J. R.; FRY, K. E. Irrigation scheduling and plant population effects on growth, bloom rates, boll abscission, and yield of cotton. **Agronomy Journal**, v.73, p.529–534, 1981.

HEILMAN, J. L.; MCLNNES, K. J.; SAVAGE, M. J. Soil and canopy energy in a west Texas vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.71, n.1, p.99-114, 1994.

HELLEGERS, P. J. G. J.; SOPPE, R.; PERRY, C. J.; BASTIAANSEN, W. G. M. Combining remote sensing and economic analysis to support decisions that affect water productivity. **Irrigation Science**, v.27, n.3, p.243-251, 2009.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. New York: Academic Press, 2004.

HORST, M. G.; SHAMUTALOV, S. S.; GONÇALVES, J. M.; PEREIRA, L. S. Assessing impacts PF surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. **Agricultural Water Management**, v.87, p.115-127, 2007.

HOU, L. G.; XIAO, H. L.; SI, J. H.; ZHOU, M. X.; YANG, Y. G. Evapotranspiration and crop coefficient of *Populus euphratica Olivi* forest during the growing season in the extreme arid region northwest China. **Agricultural Water Management**, v.97, n.2, p.351-356, 2010.

HOWELL, T. A.; EVETT, S. R.; TOLK, M.; SCHEIDER, A. D. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated. and dryland cotton on the Northern Texas High Plains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.130, n.4, p.277-285, 2004.

HRIBAL, S. A. Crop Coefficients for Cotton in Northeastern Louisiana. Thesis Master of Science Degree Thesis 60p – Agricultural and Mechanical College, Louisiana State University, Baton Rouge, 2009

HUNSAKER, D. D. Basal crop coefficients and water for early maturity cotton. **Transactions of ASAE**, v.42, n.4, p.927-936, 1999.

HUNSAKER, D. J.; PINTER JR., P. J.; BARNES, E. M.; KIMBALL, B. A. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. **Irrigation Science**, v. 22, p. 95-104, 2003.

HUSSAIN, I.; TURRAL, H.; MOLDEN, D.; AHMAD, M. Measuring and enhancing the value of agricultural water in irrigated river basins. **Irrigation Science**, v.25, p.263-282, 2007.

IBRAGIMOV, N.; EVETT, S. R.; ESANBEKOV, Y.; KAMILOV, B. S.; MIRZAEV, L.; LAMERS, J. P. A. Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation. **Agricultural Water Management**, v.90, p.112-120, 2007.

INES, A. V. M.; DROOGERS, P. Inverse modeling in estimating soil hydraulic functions: Genetic Algorithm approach. **Hydrological and Earth System Science**, v.6, p.49–65, 2002.

INES, A. V. M.; HONDA, K.; GUPTA, A. D.; DROOGERS, P.; CLEMENTE, R. S. Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v.83, p.221-232, 2006.

INES, A. V. M.; MOHANTY, B. P. Near-surface soil moisture assimilation for quantifying effective soil hydraulic properties under different hydroclimatic conditions. **Vadose Zone Journal**, v.7, n.1, p.39-52, 2008.

INMAN-BAMBER, N. G.; McGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v.83, p.125-138, 2003.

IPPISCH, O.; VOGEL, H. –J.; BASTIAN, P. Validity limits for the van Genuchten-Mualem model an implications for parameter estimations on numerical simulation. **Advances in Water Resources**, v.29, p.1780-1789, 2006.

IRMAK, A.; IRMAK, S. Reference and crop evapotranspiration on South Central Nebkaska. II: Measurement and estimation of actual evapotranspiration for corn. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.134, n.6, p.700-715, 2008.

ISTANBULLUOGLU, A. The comparison of different irrigation methods used for growing and sugarbeet under Igdýr conditions. Village Research Institute. Publication N° 24/21, Erzurum, Turkey, p.8-100, 1989.

JALOTA, S. K.; SOOD, A.; CHAHAL, G. B. S.; CHOUDHURY, B. U. Crop water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) – wheat (*Triticum aestivum* L.) system as influenced by deficit irrigation. soil texture and precipitation. **Agricultural Water Management**, v.84, p.137-146, 2006.

JENSEN, M. E. **Water consumption by agricultural plants**. In: KOZIOWSKY, T.T.. (Eds.). **Water Deficits and Plant Growth**. Vol. II. New York: Academic Press. Inc., 1968, p.1-22.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manual N° 70. ASCE, New York, 1990.

JHORAR, R. K.; BASTIAANSEN, W. G. M.; FEDDES, R. A.; VAN DAM, J. C. Inversely estimating soil hydraulic functions using evapotranspiration fluxes. **Journal of Hydrology**, v.258, p.198–213, 2002.

JIANG, J.; HUO, Z.; ZHAO, Z.; JIA, B. Application of the SWAP model to simulate water-salt transport under deficit irrigation with saline water. **Mathematical and Computer Modelling** (2010). doi:10.16/j.mcm.2010.11.014.

KANBER, R.; ONDER, S.; UNLU, M.; KOKSAL, H.; OZEKICI, B.; SEZEN, S. M.; YAZAR, A.; KOC, K. Optimization of surface irrigation methods for cotton and comparison with sprinkler irrigation. Research Report N°. 18. GAP Research Projects, Faculty of Agriculture Publication, N°.155, Cukurova University, Adana, Turkey, 148p., 1996.

KANBER, R.; YAVUZ, M. Y.; HAMDY, A. Efficient water use of cotton comparison of furrow and sprinkler irrigation methods under Cukurova conditions. Water resources and irrigation water management. Water Management. Salinity and Pollution Control Towards Sustainable irrigation in the Mediterranean Region. CIHEAM International Conference. Valenzano. Bari. Italy. 22-26 September. 1997. p.119-132.

KANG, S. Z.; ZHANG, J.H. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. **Journal of Experimental Botany**, v.55, p.2437-2446, 2004.

KARAM, F.; LAHOUD, R.; MASAAD, R.; DACCACHE, A.; MOUNZER, O.; ROUPHAEL, Y. Water use and lint yield response of drip irrigated cotton to the length of irrigation season. **Agricultural Water Management**, v.85. p.287-295, 2006.

KASSAM, A. H.; MOLDEN, D.; FERERES, E.; DOORENBOS, J. Water productivity: science and practice – introduction. **Irrigation Science**, v.25. p.185-188, 2007.

KATERJI, N.; MASTRORILL, M.; RANA, G. Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. **European Journal of Agronomy**, v.28, p.493-507, 2008.

KIMURA, R.; BAI, L.; FAN, J.; TAKAYAMA, N.; HINOKIDANI, O. Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. **Journal of Arid Environments**, v.68, p.53-65, 2007.

KO, J.; PICCINNI, G.; MAREK, T.; HOWELL, T. Determination of growth-stage-specific crop coefficients (K_c) of cotton and wheat. **Agricultural Water Management**, v.96, n.12, p.1691-1697, 2009.

KOURI, J.; SANTOS, R. F. A recuperação da produção do algodão no Brasil. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO. 6., 2007. Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Associação Mineira dos Produtores de Algodão, 2007, CD-ROM.

KROES, J. G.; VAN DAM, J. C. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Alterra-report 773, Alterra, Green World Reserch, Wageningen, 2003. 211p.

KROES, J. G.; VAN DAM, J. C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R. F. A.; JACOBS, C. M. J. SWAP version 3.2 Theory description and user manual. Alterra Report 1649, Alterra, Wageningen, 2008.

KUDOYAROVA, G. R.; VYSOTSKAYA, L. B.; CHERKOZYANOVA, A.; DODD, I. C. Effect of partial rootzone drying on the concentration of zeatin-type cytokinins in tomato (*Solanum lycopersicum L.*) xylem sap an leaves. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.161-168, 2007.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo em campo**. 3.ed., Campinas: Editora da Sociedade Brasileira de Ciências de Solo. 1996, 84p.

LI, H.; ZHENG, L.; LEI, Y.; LI, C.; LIU, Z.; ZHANG, S. Estimation of water consumption and crop productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. **Agricultural Water Management**, v.95, n.11, p.1271-1278, 2008.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 329p.

LÓPEZ-URREA, R.; MONTORO, A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; LÓPEZ-FUSTER, P.; FERERES, E. Water use of spring wheat to rise water productivity. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1305-1310, 2009.

LOUZADA, J. A.; CAICEDO, N.; HELFER, F.; Condições de drenagem relacionadas ao trânsito de máquinas em solo de várzea (RS-Brasil). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.1, p.98-106, 2008.

MA. Y.; FENG. S.; HUO. Z.; SONG. X. Application of SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing. China. **Mathematical and Computer Modelling** (2010). doi: 10.1016/j.mcm.2010.11.034.

MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance-current assessment. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.103, p.115-137, 1977.

MANDARE, A. B.; AMBAST, S. K.; TVAAI, N. K.; SINAH, J. On-farm water management saline groundwater area under scarce canal water supply condition in the Northwest India. **Agricultural Water Management**, v.95. p.516-526, 2008.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia Vegetal: fotossíntese. respiração. relações hídricas e nutrição mineral**. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2007, 469p.

MAVI, H. S.; TUPPER, G. J. **Agrometeorology: Principles and Application of Climate Studies in Agriculture**. 1.ed. New York: Food Products Press, 2004, 364p.

MEDEIROS, J. C.; SILVA, O. R. R. F.; CARVALHO, O. S. **Edafologia**. In.: BELTRÃO, N. E. M; AZEVEDO, D. M. P. (Editores). **O Agronegócio do algodão no Brasil**, v.1, 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008, cap.51, p.129-180.

MINACAPILLI, M.; AGNESE, C.; BLANDA, F.; CAMMALLERI, C.; CIRAOLO, G.; D'URSO, G.; IOVINO, M.; PUMO, D.; PROVENZANO, G.; RALLO, G. Estimation of actual evapotranspiration of Mediterranean perennial crops by means of remote-sensing based surface energy balance models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.13, p.1061-1074, 2009.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil/MMA. Secretaria de Recursos Hídricos. Universidade Federal da Paraíba; Marcos Oliveira Santana. Organizador. Brasília: MMA, 2007.

MOHAN, S.; ARUMUGAM, N. Crop coefficients of major crops in south India. **Agricultural Water Management**, v.26, n.1-2, p.67-80, 1994.

MOLDEN, D. Accounting for use and productivity. SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institute. Colombo, Sri Lanka, 1997.

MORISON, J. I. L.; BAKER, N. R.; MULLINEAUX, P. M.; DAVIES, W. J. Improving water use in crop production. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v.353, p.639-658, 2008.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v.12, n.3, p.513-522, 1976.

PENG, S.; KRIEG, D. R.; HICKS, S. K. Cotton lint yield response to accumulated heat units and soil water supply. **Field Crops Research**, v.19, p.253–262, 1989.

PENNING DE VRIES, F. W. T.; JANSE, D. M.; TEN BERGE, H. F. M.; BAKENA, A. Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops. Simulation monographs n° 29. IRRI Los Baños/Produc, Wageningen, The Netherlands, 1989.

PEREIRA, A. R.; MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; VILLA NOVA, N. A.; SENTELHAS, P. C. Difficulties with micrometeorological methods to estimate evapotranspiration in a small citrus orchard. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, n.1, p.13-20, 2003.

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; CHOLPANKULOV, E. D.; INCHENKOVA, O. P.; TEODORO, P. R. Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley. Central Asia. **Agricultural Water Management**, v.96, p.723-735, 2009.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, p.141–150, 1999.

PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R. G.; BURT, C. M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1517-1254, 2009.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: SAEAFS, 1996.

QURESHI, A. S.; ESHMURATOV, D.; BEZBORODOV, G. Determining optimal groundwater table depth for maximizing cotton production in the Sardarya province of Uzbekistan. **Irrigation and Drainage**. DOI: 10.1002/ird.586. 2010.

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

REICHARDT, K. **A água: absorção e translocação.** In: FERRI, M.G. (Ed.) **Fisiologia vegetal.** São Paulo: EPU, 1985, cap.1, p.20-21.

RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P. Métodos e estratégias de manejo de irrigação. **Circular Técnica 19.** Embrapa-Milho e Sorgo, 2002.

ROMANO, N.; SANTINI, A. Determining soil hydraulic functions from evaporation experiments by a parameter estimation approach: Experimental verifications and numerical studies. **Water Resources Research**, v.35, n.11, p.3343-3359, 1999.

ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate. The biological environment.** 2.Ed. Lincoln. Nebraska: John Wiley & Sons, 1983, 495p.

SARANGA, Y.; FLASH, I.; YAKIR, D. Variation in water-use efficiency and its relation to carbon isotope ratio in cotton. **Crop Science**, v.38, p.782–787, 1998.

SARWAR, A.; BASTIAANSEN, W. G. M.; BOERS, TH. M.; VAN DAM, J. C. Evaluating drainage design parameters for the fourth drainage project. Pakistan by using SWAP model: Part I - Calibration. **Journal of Irrigation and Drainage Systems**, v.14, p.257-280, 2000.

SARWAR, A.; FEDDES, R. A. Evaluating drainage design parameters for the Fourth Drainage Project. Pakistan by using SWAP model: Part II – modeling results. **Irrigation and Drainage Systems**, v.14, p.281-299, 2000.

SAVAGE, M. J.; EVERSON, C. S.; METELERKAMP, B. R. Bowen ratio evaporation measurement in a remote montane grassland: Data integrity and fluxes. **Journal of Hydrology**, v.376, p.249-260, 2009.

SAWAN, Z. M.; HANNA, L. I.; McCUISTION, W. L.; FOOTE, R. J. Egyptian cotton (*Gossypium barbadense*) flower and boll production as affected by climatic factors and soil moisture status. **Theoretical and Applied Climatology**, v.99, p.217-227, 2010.

SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. A modified Mualem-van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. **Vadose Zone Journal**, v.5, p.27-34, 2006.

SCORZA JÚNIOR, R. P.; SILVA, J. P.; RIGITANO, R. L. O. Simulation of moisture profiles in a latossol in Dourados region. in the state of Mato Grosso do Sul. Brazil. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.1, p.22-32, 2010.

SILVA, B. B.; RAO, T. V. R. The CWSI variations of a cotton crop in a semi-arid region of Northeast Brazil. **Journal of Arid Environment**, v.62, p.649-659, 2005.

SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. Surface energy balance and evapotranspiration of a mango orchard grown in a Semiarid environment. **Agronomy Journal**, v.99, p.1391-1396, 2007.

SINGH, R.; IRMAK, A.; IRMAK, S.; MARTIN, D. Application of SEBAL model for mapping evapotranspiration and estimating surface energy balance fluxes in south-central Nebraska. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.134, n.3, p.273-285, 2008.

SINGH, R.; KROES, J. G.; VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A. Distributed ecohydrological modeling to evaluate the performance of irrigation system in Sirsa district. India: I. Current water management and its productivity. **Journal of Hydrology**, v.329, p.692-713, 2006a.

SINGH, R.; JHORAR, R. K.. J. G.; VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A. Distributed ecohydrological modeling to evaluate irrigation system performance in Sirsa district. India: II. Impact of viable water management scenarios. **Journal of Hydrology**, v.329, p.714-723, 2006b.

SINGH, U. K.; REN, L.; KANG, S. Simulation of soil water in space and time using an agro-hydrological model and remote sensing techniques. **Agricultural Water Management**, v.97, p.1210-1220, 2010a.

SINGH, Y.; RAO, S. S.; REGAR, P. L. Deficit irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield. water productivity and yield response factor in shallow soils of semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v.97, p.965-970, 2010b.

SOARES, W. R.; SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, J. M. C. Dependência do coeficiente de cultura no estágio inicial de desenvolvimentos ($K_{c_{ini}}$) à lâmina de irrigação e textura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.23-27, 2001.

SOUSA, C. C.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, I. F.; AMORIM NETO, M. S. Avaliação de métodos de determinação de água disponível em solo cultivado com algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.3, p.337-341, 2002.

SPITTERS, C. J. T.; VAN KEULEN, H.; VAN KRAALINGEN, D. W. G. **A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87.** In: RABBINGE, R.; WARD, S. A.; VAN LAAR, H. H. (Eds.) **Simulation and systems management in crop protection.** Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen, The Netherlands, p.147-181, 1989.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes: IV. Validity of Bowen ratio-energy balance techniques for measurements water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.89, p.215-228, 1998.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, v.25, p.189-207, 2007.

STEWART, J. I.; CUENCA, R. H.; PRUITT, W. O.; HAGAN, R. M.; TOSSO, J. Determination and utilization of water production functions for principal California crops. W-67 California Contributing Project Report. Davis, United States of America, University of California, 1977.

STRZEPEK, K.; BOEHLERT, B. Competition for water for the food system. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v.355, p.2927-2940, 2010.

SULEIMAN, A. A.; SOLER, C. M. T.; HOOGENBOOM, G. Evaluating of FAO-56 crop coefficient procedures for a deficit irrigation management of cotton in a humid climate. **Agricultural Water Management**, v.9, p.33-47, 2007.

SUPIT, I.; HOOYER, A. A.; VAN DIEPER, C. A. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Vol. 1.: Theory and

algorithms. EUR publication 15956. Agricultural series. Luxembourg, 146p., 1994.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: ARTMED, 2004, 719p.

TANG, L-S.; LI, Y.; ZHANG, J. Partial rootzone irrigation increases water use efficiency. maintains yield and enhances economic profit of cotton in arid area. **Agricultural Water Management**, v.97, p.1527-1533, 2010.

TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U. S. **Irrigation and Drainage Systems**, v.19, p.355-376, 2005.

TEDESCHI, A.; MENENTI, M. Indicators of the seasonal cycle of total dissolved and absorbed salts under irrigations. **Water Resources Management**, v.16, p.89-103, 2002.

TEIXEIRA, A. H. C; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin. Brazil: Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, n.3-4, p.462-476, 2009a.

TEIXEIRA, A. H. C; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin. Brazil: Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, n.3-4, p.477-490, 2009b.

TEIXEIRA, A. H.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin. Brazil. **Agricultural Water Management**, v.94, p.31-42, 2007.

TENNAKOON, S. B.; MILROY, S. P. Crop water use and water use efficiency on irrigated cotton farms in Australia. **Agricultural Water Management**, v.61, p.179-194, 2003.

THIND, H. S.; AUJLA, M. S.; BUTTAR, G. S. Response of cotton to various levels of nitrogen and water applied to normal and paired sown cotton under drip irrigation in relation to check-basin. **Agricultural Water Management**, v.95, p.25-34, 2008.

THORNTON, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geography Review**, v.38, p.55-94, 1948.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.130, p.335-348, 2000.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. **Evaporação e evapotranspiração**. In.: TUCCI, C. E. M. (Editor). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2009, Cap.7, p.253-287.

ÜNLÜ, M.; KANBER, R.; ONDERM, S.; METIN, S.; DIKER, K.; OZEKICI, B.; OYLU, M. Cotton yields under different furrow irrigation management

techniques in the Southeastern Anatolia Project (GAP) area. Turkey. **Irrigation Science**, v.26, p35-48, 2007.

UTSET, A.; MARTÍNEZ-COB, A.; FARRÉ, I.; CAVERO, J.; Simulation the effects of extremes dry and wet years on the water use of flooding-irrigated maize in a Mediterranean landplane. **Agriculture Water Management**, v.85, p.77-84, 2006.

VAN DAM, J. C. Field-scale water flow and solute transport SWAP model concepts. parameter estimation and case studies. 1997. 167p. Doctoral Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.

VAN DAM, J. C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R. F. A.; KROES, J. Advances of modeling water flow in variability saturated soils with SWAP. **Vadoze Zone Journal**, v.7, p.640-653, 2008.

VAN DAM, J. C.; HUYGEN, J.; WESSELING, J. G.; FEDDES, R. A.; KABAT, P.; VAN WASLUM, P. E. V. Simulation of transport processes in the Soil-Water-Air-Plant environment. SWAP Users' Manual. DLO-Winand String Centre: Wageningen, The Netherlands, 1997.

VAN DAM, J. C.; SINGH, R.; BESSEMBINDER, J. J. E.; LEFFELAAR, P. A.; BASTIAANSEN, W. G. M; JHORAR, R. K.; KROES, J. G.; DROOGERS, P. Assessing options to increase water productivity in irrigation river basins using remote sensing and modeling tools. **Water Resources Development**, v.22, n.1, p.115-133, 2006.

VAN DER BROEK, B. J.; VAN DAM, J. C.; ELBERS, J. A.; FEDDES, R. A.; HUYGEN, J.; KABAT, P.; WESSELING, J. G. SWAP 1993. Input instructions

Manual. Report 45, Dept. of Water Resources, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 1994.

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

VAN GENUCHTEN, M. Th.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. R. S. Kerr Environmental Research Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency, Oklahoma, USA, 83p., 1991.

VAZIFEDOUST, A.; VAN DAM, J. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; FEDDES, R. A. Assimilation of satellite data into agrohydrological models to improve crop yield forecast. **International Journal of Remote Sensing**, v.30. p.2523-2545, 2009.

VAZIFEDOUST, M.; VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A.; FEIZI, M. Increasing water productivity of irrigation crops under limited water supply at field scale. **Agricultural Water Management**, v.95, p.89-102, 2008.

VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L. Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. **Journal of Applied Meteorology**, v.17, p.330-338, 1978.

VOGEL, T.; VAN GENUCHTEN, M. T.; CISLEROVA, M. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturated on variability-saturated flow predictions. **Advances in Water Resources**, v.24, p.133-144, 2001.

WANG, J.; SAMMIS, T. W.; GUTSCHICK, V. P.; GEBREMICHAEL, M.; MILER, D. R. Sensitivity analysis of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL). **Transactions of ASABE**, v.52, n.3, p.801-811, 2009.

WESSELING, J. G.; ELBERS, J. A.; KABAT, P.; VAN DER BROEK, B. J. SWATRE: instructions for inputs. Internal note. Winand Staring Centre. Wageningen, The Netherlands, International Waterlogging and Salinity Research Institute, Lahore, Pakistan, 29p, 1991.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.63, n.11, p.1309-1313, 1982.

WOLF, J. Calibration of WOFOST crop growth simulation model for use within CGMS. Wageningen University publication: 32p., 2003.

YAZAR, A.; SEZEN, S. M.; SESVEREN, S. LEPA and trickle irrigation of cotton in the Southeast Anatolia Project (GAP) area in Turkey. **Agricultural Water Management**, v.54, n.3, p.189-203, 2002.

ZEGGAF, A. T.; TAKEUCHI, S.; DEHGHANISANIJ, H.; ANYOJI, H.; YANO, T. A Bowen ratio technique for portioning energy fluxes between maize transpiration and soil surface evaporation. **Agronomy Journal**, v.100, p.988-996, 2008.

ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; TONG, L.; DU, T. Variation in vineyard evapotranspiration in an arid region of northwest China. **Agricultural Water Management**, v.97, p.1898-1904, 2010.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. **Agricultural Water Management**, v.69, p.115-133, 2004.