

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE - CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS - GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**



FRANKLIN ALVES DOS ANJOS

**SIMULAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DE MILHO EM DIFERENTES
ÉPOCAS DE SEMEIO EM ARAPIRACA, ALAGOAS, PELO MODELO
AQUACROP**

RIO LARGO - AL

2011

FRANKLIN ALVES DOS ANJOS

**SIMULAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DE MILHO EM DIFERENTES
ÉPOCAS DE SEMEIO EM ARAPIRACA, ALAGOAS, PELO MODELO
AQUACROP**

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Produção Vegetal e Proteção de Plantas.

Orientação: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza

RIO LARGO - AL

2011

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

A599s Anjos, Franklin Alves dos.
Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop / Franklin Alves dos Anjos. – 2011. 70 f. : tabs.

Orientador: José Leonaldo de Souza.
Dissertação (mestrado em Agronomia : Produção Vegetal) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2011.

Bibliografia: f. 46-54.

Anexos: [55]-70.

1. Milho – Previsão de safra. 2. *Zea Mays* L. 3. Modelagem computacional. 4. AquaCrop. I. Título.

CDU: 633.15

FRANKLIN ALVES DOS ANJOS

**SIMULAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DE MILHO EM DIFERENTES
ÉPOCAS DE SEMEIO EM ARAPIRACA, ALAGOAS, PELO MODELO
AQUACROP**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Produção Vegetal e Proteção de Plantas.

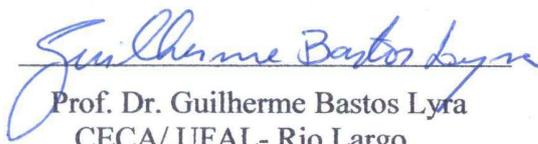
APROVADA em 27 de outubro de 2011



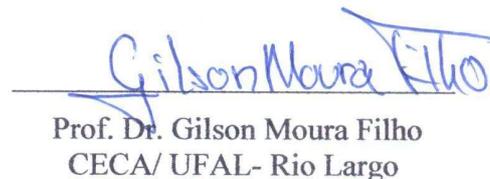
Prof. Dr. José Leonaldo de Souza
(Orientador - UFAL)



Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira Maia
IFAL - Campus Murici



Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra
CECA/ UFAL- Rio Largo



Prof. Dr. Gilson Moura Filho
CECA/ UFAL- Rio Largo

A Deus, por ter me concebido a oportunidade de habitar esse plano físico, as minhas filhas Lorena e Letícia, aos meus pais Elias e Marinalva, aos meus irmãos Wanrobety e Herbety.

DEDICO

“O que se exige do homem é que seja útil ao maior número de semelhantes, se possível. Caso não consiga, sirva a poucos, ou aos mais próximos, ou a si mesmo.”

Sêneca, c.a.4 a.C-ca. 65 d.C.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Dr. José Leonaldo de Souza, pelos ensinamentos, exemplo de humildade e sabedoria;

Ao professor Dr. Gustavo Bastos Lyra da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, pelas correções e sugestões neste trabalho;

Ao Eng^o Agr^o Msc. Rui Palmeira de Medeiros pelo fornecimento dos dados experimentais;

Aos colegas de laboratório: Ricardo Araújo, Cícero Manoel, Maurício Prado, Marshall Victor, Renan Cantalice, Adolpho, Klebson, Anthony Carlos, Renato Araújo, André Luiz pela convivência e amizade;

Aos colegas de turma do mestrado: Ronaldo Bernadino dos Santos Júnior, Sheila dos Santos Tavares, Marília Gracelídia dos Santos Barros, Thiago Jorge de Araújo Barbosa, Humberto Cristiano de Lins Wanderley, Danilo César Oliveira de Cerqueira, Leonardo da Fonseca Barbosa, Luis Sérgio Costa Duarte Filho, Sandra Hiromi Kamei, Débora Teresa da Rocha Gomes Ferreira e Leiliane Alves de Souza;

Ao corpo docente do curso de Mestrado em Agronomia-Produção Vegetal- CECA/UFAL, em especial aqueles com os quais convivi: Prof. Dr^a. Vilma Marques Ferreira, Prof. Dr. Laurício Endres, Prof. Dr. Paulo Vanderlei Ferreira, Prof. Dr. José Paulo Vieira, Prof. Dr^a Edna Maria Mendes Aroucha e Prof. Dr^a. Leila de Paula Resende;

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação, Geraldo Lima, Rinaldo e Marcos;

Aos amigos João Vital e Hanny, por sua inestimável contribuição na tradução de artigos científicos;

Ao CNPq/ CAPES, pelo apoio financeiro concedido aos projetos do Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar- LARAS/ UFAL;

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Alagoas-FAPEAL, pelo auxílio financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho;

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para realização desse sonho;

Meus cordiais e sinceros agradecimentos.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Franklin Alves dos Anjos, filho de Elias Ferreira dos Anjos e Marinalva Alves dos Anjos, nasceu na cidade de Pão de Açúcar, Estado de Alagoas, em 04 de fevereiro de 1975.

Ingressou na Universidade Federal de Alagoas, para cursar Agronomia no primeiro semestre do ano de 1995 e em 31 de março de 2000 foi graduado Engenheiro Agrônomo.

Durante sua vida acadêmica desenvolveu atividades como bolsista de iniciação científica entre os anos de 1997 a 1999.

Iniciou sua vida profissional como Diretor do Departamento de Fomento Agropecuário-DEFA, da Prefeitura Municipal de Paulo Afonso em 2001, permanecendo no cargo até 2004. Durante este período, especializou-se em Fertilidade do Solo, Nutrição de Plantas e Fundamentos do Agronegócio (*Lato Sensu*) pela Universidade Federal de Lavras-UFLA/ MG.

Trabalhou como representante técnico de vendas no Estado do Mato Grosso pela multinacional Tradecorp do Brasil Comércio de Insumos Agrícolas Ltda., empresa especializada em fertilizantes especiais e nutrição foliar, entre os anos de 2005 e 2006. Ainda no Mato Grosso, entre 2006 e 2007 foi responsável técnico e supervisor de vendas da Sementes ACampo, empresa destinada à produção e comercialização de sementes de pastagens.

Prestou consultoria em diversas Prefeituras de municípios do Semi-Árido Alagoano, dentre elas Pão de Açúcar, Palestina, São José da Tapera e Senador Rui Palmeira no período compreendido entre 2008 e 2009.

No segundo semestre de 2009, através de processo seletivo, ingressou no Mestrado em Agronomia, área de concentração - Produção Vegetal, da Universidade Federal de Alagoas.

RESUMO

O milho (*Zea mays L.*), devido a sua importância na dieta alimentar humana e animal, é uma das culturas mais difundidas no mundo. No Brasil, é cultivado em praticamente todas as regiões, devido a isto, tem sido foco da modelagem agrometeorológica por décadas. O modelo AquaCrop foi utilizado nesse trabalho com o objetivo de simular a produção de biomassa total e diária, produtividade de grãos, bem como obter a previsão de safra do milho para região de Arapiraca, Alagoas. O modelo usa a cobertura do dossel (CD), em vez do índice de área foliar (IAF), como base para calcular separadamente a transpiração das plantas e a evaporação da água do solo. A produtividade é calculada como o produto da biomassa e do índice de colheita (IC). Os dados de entrada do modelo foram de experimento realizado por Medeiros (2008), no povoado Batingas no município de Arapiraca-AL. Para as quatro épocas de semente, os resultados do armazenamento de água no solo simulados pelo modelo AquaCrop apresentaram tendência de variação similar aos valores observados. Porém, para terceira época de semeadura o armazenamento observado apresentou valor máximo (171,66 mm) aos 35 DAE, enquanto que o valor máximo simulado (115,0 mm) ocorreu aos 24 DAE. Para a produção de biomassa final (kg ha^{-1}) os valores máximos e mínimos observados (simulados) variaram entre 13.059 (11.861) e 9.873 (8.306) para 3ª e 4ª época de semeadura, respectivamente. A produtividade de grãos simulada foi entre 4.406 e 2.069 kg ha^{-1} , para a 3ª e 4ª época de semeadura, subestimando em 2,0% (3ª ES) e superestimando em 5,1 % (4ª ES). A superestimativa da 4ª época de semeadura deve-se ao ajustamento da profundidade do sistema radicular em 0,75 m, em que para as demais épocas de semeadura a profundidade considerada foi 0,60 m (MEDEIROS et al., 2008). O modelo AquaCrop é uma ferramenta para previsão da produtividade de milho da variedade AL Bandeirante. Esse procedimento permite obter adequada estimativa do rendimento de grãos com 18 dias de antecedência à colheita na região do Agreste Alagoano, disponibilizando aos usuários finais do modelo programar o armazenamento, logística e comercialização da safra de grãos a ser colhida.

Palavras-chave: Modelagem. AquaCrop. Previsão de Safra.

ABSTRACT

The maize (*Zea mays L.*), due to its importance in human and animal diet, is one of the most widespread crop in the world. In Brazil, it is cultivated in almost all regions, due to this, has been the focus of agrometeorological modeling for decades. The AquaCrop model was used in this work in order to simulate the total biomass and daily yield, and get the corn crop forecast for the region of Arapiraca, Alagoas. The model uses the canopy cover (CC), instead of leaf area index (LAI) as a basis for separate calculations of the plant transpiration and evaporation of soil water. The productivity is calculated as the product of biomass and harvest index (HI). The input data of model experiments were performed by Medeiros (2008), in Batingas town in the country of Arapiraca-AL. For four seasons of sowing, the results of soil water storage simulated by the model AquaCrop tended to be similar to those observed variation. However, for the third sowing date had observed the storage maximum value (171.66 mm) at 35 DAE, whereas the maximum simulated (115.0 mm) occurred at 24 DAE. For the final yield biomass (kg ha^{-1}) the maximum and minimum values observed (simulated) ranged from 13.059 (11.861) and 9.873 (8.306) for 3rd and 4th season of planting, respectively. The simulated grain yield was between 4.406 and 2.069 kg ha^{-1} for the 3rd and 4th sowing time, underestimating by 2.0% (3rd SS) and overestimated by 5.1% (4th SS). The overestimation of the 4th season of sowing due to the adjustment of the depth of the root system at 0.75 m, where for the other seasons of sowing depth considered was 0.60 m (MEDEIROS et al., 2008). The AquaCrop model is a tool to predict corn yield of the AL Bandeirante variety. This procedure allows for adequate estimation of grain yield with 18 days prior to harvest in the Agreste region of Alagoas, providing end users of the model program storage, logistics and marketing of grain crop to be harvested.

Keywords: Modeling. AquaCrop. Crop Forecast.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Épocas de semeadura, datas de plantio e fases fenológicas (Emergência, Florescimento e Maturidade) para cultura do milho na região de Arapiraca- AL, 2008.	27
Tabela 2 - Propriedades do solo [camadas, textura, profundidade, ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de campo (CC), saturação e condutividade hidráulica saturada (K_{sat})], para área de cultivo de milho no Povoado Batingas, Arapiraca- AL, 2008.	29
Tabela 3 - Critério de interpretação do desempenho do modelo AquaCrop, pelo índice “c”. .	33
Tabela 4 - Época de semeadura, armazenamento de água no solo, d Willmont e raiz quadrada do erro médio (RMSE), para cultura do milho na região de Arapiraca-AL, 2008. .	37
Tabela 5 - Biomassa final (simulada e observada), rendimento de grão (simulado e observado) e porcentagem de desvio (%) da cultura do milho para quatro épocas de semeadura na região de Arapiraca-AL, 2008.	41
Tabela 6 - Épocas de semeadura (1 ^a a 4 ^a), raiz quadrada do erro médio (RMSE), coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmont (d), índice de confiança (c) e desempenho do modelo AquaCrop para produção de biomassa da cultura do milho na região de Arapiraca-AL, 2008.	43
Tabela 7 - Época de semeadura e previsão (dias) da biomassa total e produtividade de grãos, para cultura do milho na região de Arapiraca-AL, 2008.	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do Estado de Alagoas destaque para o município de Arapiraca.	26
Figura 2 - Esquema do AquaCrop com indicação das principais componentes do continuum solo-planta-atmosfera (adaptado de RAES et al., 2011).	28
Figura 3 - A zona de raiz como reservatório de água do solo (adaptado de RAES et al., 2009).	29
Figura 4 - Variação da cobertura do dossel (CD) durante todo o ciclo da cultura sob condições não estressantes (adaptado de RAES et al., 2011).	30
Figura 5 - Precipitação pluvial observada (barras), armazenamento de água (Arm) no solo simulado (linha cheia) e observado (linha cheia com círculo aberto), para quatro épocas de semeadura de milho na região de Arapiraca-AL, 2008.	36
Figura 6 - Biomassa acumulada simulada (linha com círculo fechado) e observada (linha cheia), para quatro épocas de semeadura de milho na região de Arapiraca-AL, 2008.	39
Figura 7 - Análise de regressão para biomassa acumulada simulada e observada, para quatro épocas de semeadura de milho na região de Arapiraca-AL, 2008.	42

LISTA DE SÍMBOLOS

IC	Índice de colheita, %
ET	Evapotranspiração, mm d ⁻¹
Tr	Transpiração da cultura, mm d ⁻¹
E	Evaporação do solo, mm d ⁻¹
Y	Rendimento da cultura, kg ha ⁻¹
B	Biomassa, kg ha ⁻¹
Arm	Armazenamento, mm
DAE	Dias após a emergência
TDR	Reflectometria de domínio de tempo
ES	Época de semeadura
<i>d</i>	Índice de concordância
RMSE	Raiz quadrada do erro médio
P	Precipitação, mm
r	Coefficiente de correlação
c	Índice de confiança
DAC	Dias antes da colheita
Trx	Transpiração máxima, mm
Tr	Transpiração real, mm
Ex	Evaporação máxima, mm
E	Evaporação real, mm
Dr	Drenagem, mm
Esc	Escoamento superficial, mm

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 A cultura do milho.....	15
2.2 Água como fator de produtividade	17
2.3 Condições Ambientais.....	20
2.4 Modelagem na agricultura.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1 Dados experimentais utilizados nas simulações.....	26
3.2 Ambientes atmosféricos e solo	27
3.3 Parâmetros conservadores e da cultura.....	30
3.4 Cálculo da Biomassa	30
3.5 Análise dos dados	32
3.5.1 Índice de Concordância	32
3.5.2 Coeficiente de Correlação de Pearson	32
3.5.3 Índice de confiança.....	33
3.5.4 Porcentagem de Desvio	33
3.5.5 Raiz Quadrada do Erro Médio.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Armazenamento de água no solo.....	35
4.2 Biomassa Total e Produtividade de grãos.....	38
4.3 Previsões de safra	43
5 CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS	46
ANEXOS	55

1 INTRODUÇÃO

Em função do seu valor nutritivo e das altas produtividades alcançadas, a cultura do milho (*Zea mays L.*) é um dos cereais mais cultivados no mundo, apresentando grande importância social e econômica. O milho se destina tanto para o consumo humano, como para alimentação animal, em ambos os casos, algum tipo de transformação industrial pode ser necessária. Nos últimos anos, a produtividade de milho no Nordeste Brasileiro vem aumentando, devido ao uso de variedades e híbridos que atendam aos diferentes sistemas de produção (CARVALHO et al., 2005). Contudo, nesta região a maior parte do cultivo de milho é de subsistência e em regime de sequeiro, e dessa forma, depende das condições edafoclimáticas. No Estado de Alagoas, a cultura do milho é semeada no início do período das águas, assim, assegura-se que pelo menos parte do seu ciclo ocorra sob condições hídricas favoráveis ao seu crescimento e desenvolvimento (LYRA et al., 2010).

O crescimento das culturas é influenciado por diversos fatores ambientais. Assim, decisões sobre o manejo da cultura devem ser tomadas continuamente desde o período de pré-plantio até o período de pós-colheita, considerando a complexa interação entre a planta e o ambiente (ANDRIOLO, 1999). A grande variabilidade dos fatores ambientais que influenciam a produtividade agrícola tem redirecionado o planejamento dos projetos de pesquisa, dessa forma, modelos de simulação têm se tornado ao longo dos anos uma ferramenta altamente eficiente e complementar às pesquisas experimentais convencionais (BOOTE et al., 1996; COSTA, 1997; PEREIRA, 1987 apud COSTA & BARROS, 2001).

Modelo de cultura pode ser descrito como um sistema de previsão de crescimento, desenvolvimento e produtividade de uma cultura, dado um conjunto de características genéticas e fatores ambientais relevantes (MONTEITH, 1996). A proposição de modelos agrometeorológicos é justificável por se tratarem de uma importante ferramenta no planejamento de um sistema agrícola. Tais definições racionalizam a produção permitindo maior aproveitamento dos recursos naturais, favorecendo o planejamento de atividades ao nível de propriedade e zoneamento agrícola ao nível de região (FANCELLI & DOURADO NETO, 1999a).

A agricultura é a atividade que mais consome água em termos de volume no mundo. Nos próximos anos, o setor agrícola será capaz de competir com municípios e indústria para escassez de água e ainda está sob pressão para produzir mais alimentos e fibras para satisfazer o crescimento da população mundial. No contexto da eficiência do uso da água, o software AquaCrop foi desenvolvido pela FAO para auxiliar consultores, gestores de recursos hídricos,

agrônomos e até mesmo gerentes de fazenda à formulação de diretrizes para aumentar a produtividade agrícola dos sistemas de sequeiro e irrigado (RAES et al., 2009).

Na verdade, o modelo converte transpiração diária (Tr), diretamente para produção de biomassa por dia, utilizando a evapotranspiração de referência diária (ET_o) e produtividade de água padronizada (WP), um parâmetro conservador (praticamente constante) específico para cada espécie vegetal. Além disso, o modelo é caracterizado pela simplicidade, precisão e robustez, e dá especial atenção aos processos fundamentais envolvidos na produtividade das culturas através de uma perspectiva fisiológica e agronômica (HSIAO et al., 2009).

Portanto, o objetivo do referido trabalho foi testar o modelo de simulação agrometeorológico AquaCrop para produtividade de grãos, biomassa total e diária, bem como obter a previsão de safra para quatro épocas de semeadura do milho em Arapiraca, Alagoas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do milho

O milho é uma das culturas mais importantes que a humanidade conhece, respondendo por quase 30% da produção global total de grãos. É cultivada em mais de 158 milhões de hectares no mundo inteiro, produzindo mais de 516 milhões de kg de grãos (FAOSTAT, 2009). Recentemente, a procura de milho tem aumentado, uma vez que é usado para produzir etanol como biocombustível, além de ser alimento básico em muitos países e servir de alimentação para animais na forma de forragem, silagem ou grãos. A forte demanda está impondo maior pressão sobre a produção, como consequência, a competição pela água disponível. Melhorar a eficiência do uso da água para produção de milho é de fundamental importância para se obter maior produtividade da cultura considerando o declínio dos recursos de irrigação em todo o mundo e a incerteza na precipitação pluvial decorrente da mudança climática global (HENG et al., 2009).

As últimas 10 safras de milho mudaram o conceito do Brasil no mercado mundial. O País, que antes era um importador, passou à condição de terceiro maior exportador, superado apenas pelos Estados Unidos e Argentina. O rendimento dobrou com o avanço tecnológico de cultivares transgênicas e de híbridos de alta produtividade. A chamada safrinha, nas regiões Centro-Oeste e Sudeste e nos estados do Paraná e da Bahia, consolida um reforço de produção que equivale a dois terços da safra de verão, que até a pouco mais de uma década era a única no território nacional. Essa diferença fez o Brasil se tornar autossuficiente e gerou excedentes que o elevaram à potência na colheita e comercialização do cereal (ANUÁRIO BRASILEIRO DO MILHO, 2011).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, sendo superado apenas pelos Estados Unidos e China. A área semeada no Brasil na safra 2009/ 2010 foi cerca de 13 milhões de ha, conferindo produtividade média de 4.311 kg ha⁻¹, totalizando 56 milhões de toneladas de grãos. Desse montante a região nordeste foi responsável por mais de 4,2 milhões de toneladas, em área correspondente acima dos 2,6 milhões de ha, apresentando produtividade média de 1.613 kg ha⁻¹. O Estado de Alagoas contribuiu com 1 % (42 mil t) desse total, com produtividade média de 720 kg ha⁻¹ em 58 mil ha de área cultivada (CONAB, 2011). A agricultura familiar é responsável pelo cultivo do milho no município de

Arapiraca, onde na safra 2009/ 2010 apresentou área plantada de 900 ha, com produtividade total de 1.150 t ha⁻¹ e rendimento médio de 1.277 kg ha⁻¹ (IBGE, 2011).

Na maioria das regiões produtoras, a cultura do milho vem sendo conduzida sob condições climáticas favoráveis. O milho é cultivado em praticamente todo o território nacional, onde 90 % da produção está concentrada nas regiões Sul, Sudeste e Centro - Oeste. O milho é insumo para produção de uma centena de produtos, porém na cadeia produtiva de suínos e aves são consumidos aproximadamente 70% do milho produzido no mundo e entre 70 e 80% do milho produzido no Brasil (EMBRAPA, 2010).

A importância dessa cultura ainda está relacionada ao aspecto social, pois grande parte das propriedades rurais não são altamente tecnificadas, e não são constituídas por grandes extensões de terras, mas dependem dessa produção para sua subsistência. Isto pode ser constatado pela quantidade de produtores que consomem essa gramínea na propriedade. Em relação ao uso de variedades, embora tenham, teoricamente, menor potencial genético de produção que os híbridos, estas apresentam maior estabilidade de produção. Além disso, por terem menor custo de produção, são encontradas no mercado a preços mais baixos do que os híbridos. Por essa razão, seu uso tem sido mais difundido entre produtores menos capitalizados, existindo, inclusive, ações de entidades governamentais e não governamentais para a sua difusão.

Nas regiões Norte e Nordeste, onde a oferta de híbridos é mais limitada, tem havido grande difusão do uso de variedades (CRUZ et al, 1996). O milho variedade não é resultado de um cruzamento controlado de linhagens, isto é, não é uma semente híbrida. Ele constitui um conjunto de plantas, cada uma com um genótipo diferente e que foi submetida a processo de seleção para formar uma variedade. As sementes de milho variedade desde que tomadas os devidos cuidados na multiplicação, podem ser reutilizadas por alguns anos, sem prejuízos à produtividade. Outro aspecto importante em relação ao uso das variedades é a produção de sementes pelo próprio agricultor, permitindo obter sementes a baixo custo, estando disponíveis para semeadura em qualquer época. Contudo, ao produtor que deseja produzir sua própria semente, é recomendado que renove seu estoque básico após três a quatro gerações de multiplicação na propriedade e procure orientação junto a um escritório de assistência ou extensão rural local (DELMAR et al, 2004).

Quanto aos híbridos, segundo Ehlers (1993), eles só têm alto vigor e produtividade na primeira geração. Portanto, é necessária a aquisição de sementes de milho híbrido todos os anos. Se os grãos colhidos forem cultivados, o que corresponde ao cultivo da segunda geração, dependendo do tipo do híbrido, poderá haver redução de 15% a 40% na

produtividade, perda de vigor e grande variação entre as plantas. Além disso, de nada adianta usar semente de alto potencial produtivo e de maior custo se o manejo e as condições da lavoura não permitirem que a semente expresse todo o seu potencial genético.

O milho tem sido o foco da modelagem por décadas. O AquaCrop foi parametrizado e testado em milho utilizando os dados coletados de seis estações na Universidade da Califórnia em Davis (HSIAO et al., 2009). Esse estudo mostrou que o AquaCrop foi capaz de simular corretamente a cobertura do dossel, desenvolvimento da biomassa e produtividade de grãos de quatro cultivares de milho ao longo de seis safras diferentes. No mesmo período, ocorreu calibração preliminar para outras culturas, incluindo o algodão (*Gossypium hirsutum* L.) (FARAHANI et al., 2009) e quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) (GEERTS et al., 2009).

2.2 Água como fator de produtividade

Em grande parte do mundo, a água sempre foi o principal fator limitante à produção agrícola, onde as chuvas não são suficientes. Com os recentes aumentos na demanda das “commodities agrícolas” e a crise alimentar, que se seguiu em países pobres e em desenvolvimento, a necessidade de melhorar a eficiência do uso da água na produção agrícola tornou-se mais evidente (HSIAO et al., 2009).

A produtividade de uma cultura agrícola está condicionada a vários fatores referentes ao solo, à planta e ao clima. Dentre estes, a água é um fator essencial e seu manejo racional é fundamental na otimização da produção agrícola. Em função da quantidade utilizada, a água proporciona variação na produtividade da cultura e na qualidade do produto. Atualmente, a utilização racional dos recursos utilizados na agricultura é uma necessidade, de modo a garantir sua disponibilidade para uso futuro (DELGADO et al., 2010). Frizzone et al., (2005) afirmaram que a produtividade pode ser expressa exclusivamente em função da água utilizada pelo cultivo, estando todas as outras variáveis inerentes à produtividade em nível ótimo. O decréscimo na disponibilidade de água no solo ocasiona queda no potencial da água na folha diminuindo a turgidez celular, a condutância estomática e a transpiração (SHALHEVET, 1993; RAY & SINCLAIR, 1997).

A redução na taxa de assimilação de CO₂ durante o deficit hídrico é atribuída, em grande parte, à diminuição da abertura estomática em resposta à redução da disponibilidade de água no solo (ROSA et al., 1991). Chaves (1991) observou que, dependendo da espécie e da intensidade da desidratação, a assimilação de carbono pode diminuir a valores próximos de

zero. Por outro lado, em plantas sem restrição hídrica, a condutância estomática pode aumentar com a diminuição do potencial de água na folha, resultando de uma maior taxa de transpiração à medida que a abertura estomática aumenta (JONES, 1992).

A cultura do milho exige um mínimo de 400-600 mm de precipitação pluvial para que possa manifestar seu potencial produtivo, porém este volume é variável, principalmente em função da região de cultivo e das condições edafoclimáticas. O consumo de água geralmente oscila entre 4 e 6 mm d⁻¹ (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004). O volume de precipitação não é considerado como bom indicador de disponibilidade hídrica para cultura, pois esta depende do padrão de distribuição das chuvas, tipo de solo, umidade relativa do ar, entre outros fatores que interferem na retenção de água no solo e na evapotranspiração da cultura (GALON et al., 2010).

A quantidade de água disponível para cultura encontra-se na dependência da profundidade explorada pelas raízes, da capacidade de armazenamento de água do solo e da densidade radicular da planta. Assim, o manejo do solo e da cultura apresenta importância para o crescimento e distribuição do sistema radicular, e dessa forma, favorece o aproveitamento eficiente da água no processo produtivo. A ocorrência de moderada deficiência de água, no início do desenvolvimento da cultura, pode concorrer para estimular maior desenvolvimento radicular das plantas, desde que o solo, abaixo de 20 cm da superfície, tenha água armazenada e disponível às plantas (MANFRON et al., 2003).

Para o milho, as maiores exigências em água se concentram na fase de emergência, florescimento e enchimento do grão. Todavia, no período compreendido entre 15 dias antes e 15 dias após o aparecimento da inflorescência masculina (pendão floral), o requerimento de um suprimento hídrico satisfatório, aliado as temperaturas adequadas, torna tal período extremamente crítico para determinação da produtividade. O consumo de água por parte do milho, em clima quente e seco, raramente excede 3,0 mm d⁻¹, enquanto a planta estiver com altura inferior a 30 cm. Entretanto, durante o período compreendido entre o espigamento e a maturação, o consumo pode aumentar de 5,0 a 7,5 mm d⁻¹ (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004).

Com adequada disponibilidade hídrica e alta demanda evaporativa da atmosfera, a taxa de transpiração é elevada. Porém, se a planta não consegue absorver água suficiente para repor as perdas por transpiração, ou seja, quando há desequilíbrio entre transpiração e absorção, o potencial da água na planta começa a diminuir (deficit hídrico), isto pode ou não causar estresse à planta e vai depender da intensidade do deficit. Portanto, o deficit hídrico na planta é um fenômeno quase que diário, podendo ocorrer mesmo em condições de alta

disponibilidade de água no solo. Durante o dia, a planta perde mais água do que consegue absorver até, aproximadamente, o meio da tarde. Em seguida, com a diminuição da demanda evaporativa atmosférica, a planta absorve mais água que a perda por transpiração, iniciando a recuperação do deficit, até que ocorra o equilíbrio dos potenciais durante a noite. Se não houver reposição de água no solo por precipitação pluvial ou por irrigação, o estresse se tornará irreversível. Este processo depende da demanda evaporativa da atmosfera, da capacidade de armazenagem de água no solo, das características da cultura e do estágio de desenvolvimento da planta (MONTEIRO, 2009).

Com redução na taxa de evapotranspiração, parte da energia que seria consumida neste processo será utilizada em outros processos, como no aquecimento do solo, aquecimento do ar e no sistema como um todo, diminuindo a umidade relativa. Assim, qualquer cultura submetida a deficit hídrico, haverá maior demanda evaporativa do ar junto às plantas, conduzindo-as a estresse mais rápido e intenso. O deficit hídrico afeta praticamente todos os aspectos relacionados ao crescimento e desenvolvimento das plantas, reduzindo a área foliar, diminuindo a fotossíntese e interferindo em vários outros processos, além de alterar o ambiente físico das culturas, por modificar o balanço de energia do sistema (BERGAMACHI, 1992). Os efeitos causados pelo deficit hídrico são devidos às modificações na anatomia, morfologia, fisiologia e bioquímica das plantas.

Os modelos de simulação que avaliam os efeitos da água sobre o rendimento das culturas são ferramentas importantes para o manejo da água e na irrigação. Como o nome indica, o foco do AquaCrop é a água como fator determinante à produtividade das culturas. O modelo converte diretamente a transpiração diária em produção de biomassa por dia, utilizando a evapotranspiração de referência diária e a produção de biomassa padronizada em relação ao uso da água (parâmetro específico para cada espécie vegetal). Souza et al. (2005), determinaram a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith parametrizado no boletim FAO56 (ALLEN et al., 1998) para as quatro fases da cultura do milho na região de Arapiraca com valores oscilando em torno de 3,5 mm d⁻¹.

No AquaCrop o deficit hídrico manifesta-se através da inibição do crescimento do dossel, promove inibição da condutância estomática, provoca a senescência precoce da copa alterando o índice de colheita (HSIAO et al., 2009). O índice de colheita pode ser afetado pelo estresse hídrico de forma bastante complexa, dependendo da severidade do estresse e do intervalo de tempo relativo ao processo reprodutivo (KEMANIAN et al., 2007). De acordo com Fereres & Soriano (2007), o estresse hídrico antes da fase reprodutiva pode melhorar em alguns casos o índice de colheita (IC), este efeito está relacionado à redução do acúmulo de

biomassa. A influência do estresse hídrico sobre o IC, em pré-florescimento e pós-florescimento, também é simulado no ALMANAC (KINIRY et al., 1992). Neste modelo, o estresse hídrico para pré-florescimento aumenta o IC simulado em até 10% do valor potencial, enquanto o estresse hídrico durante a floração e enchimento de grãos diminui o IC simulado em 15%.

O deficit hídrico pode se desenvolver a qualquer momento durante o ciclo de vida da cultura, afetando a transpiração e, portanto, o acúmulo de biomassa. Para culturas de grãos, frutos, tubérculos e raízes, apenas parte da biomassa é direcionada para os órgãos responsáveis pelo rendimento. O crescimento da folha é muito mais sensível ao deficit hídrico do que o crescimento das raízes e órgãos reprodutivos, presumivelmente, os estômatos são menos sensíveis ao estresse hídrico do que o crescimento da folha (HSIAO & XU, 2000).

2.3 Condições Ambientais

O ambiente de luz em que a planta cresce é de fundamental importância, pois a adaptação das plantas a este ambiente depende do ajuste do seu aparelho fotossintético, de modo que a luminosidade ambiental seja utilizada de maneira mais eficiente possível. As respostas destas adaptações serão refletidas no crescimento global da planta (ENGEL & POGGIANI, 1991). A disponibilidade de radiação solar é um dos fatores que mais limitam o crescimento e desenvolvimento das plantas. Toda energia necessária para a realização da fotossíntese, processo que transforma o CO₂ atmosférico em energia metabólica, é proveniente da radiação solar (TAIZ & ZIEGER, 2004). A maior ou menor adaptação das espécies às diferentes condições de radiação solar depende do ajuste de seu aparelho fotossintético, de modo a garantir maior eficiência de uso da radiação na produção de fotoassimilados, o que resulta em maior produtividade de grãos (VILELA & RAVETTA, 2000).

A interceptação da luz pelo dossel é dependente, além da densidade e do arranjo das plantas, de um conjunto de características morfológicas dos vegetais como: estatura e número de plantas, área foliar, distribuição e ângulo foliar (MARCHÃO et al., 2006). Híbridos modernos de milho possuem ângulo de inserção foliar menor, ou seja, folhas mais eretas, que possibilitam melhor distribuição da radiação no dossel. Essa arquitetura ocasiona maior eficiência no uso da radiação, além de proporcionar incremento na utilização de fertilizantes, aplicação de herbicidas, adoção do sistema de plantio direto, além de outros fatores que

favorecem o cultivo adensado. As plantas que interceptam elevada quantidade de luz na fase inicial de desenvolvimento apresentam maior sucesso competitivo (FLECK et al., 2003). Maiores índices de área foliar em milho, obtidos com alteração do espaçamento entre linhas, podem não alterar a quantidade de radiação solar interceptado devido ao maior sombreamento potencial do extrato inferior do dossel (STRIEDER et al., 2008).

A competição por luminosidade poder ser inter ou intraespecífica, a primeira diz respeito a plantas de espaçamentos diferentes e a segunda resulta da competição entre plantas da mesma espécie. Em caso de elevada competição interespecífica na cultura do milho por radiação solar há maior alocação de assimilados no colmo, o que ocasiona maior estatura das plantas e maior interceptação da radiação. Porém, os assimilados alocados no tecido do colmo não mais serão realocados para o enchimento de grãos, vindo a reduzir o índice de colheita (IC) da cultura. A maior taxa de crescimento da parte aérea, no início do ciclo da cultura proporciona melhor habilidade competitiva por radiação solar, exercendo supressão às plantas daninhas (FLECK et al., 2003). Este efeito é mais significativo com a redução do espaçamento entre linhas das culturas, o que possibilita rápido fechamento do solo pelo dossel, maior interceptação da radiação e eficiência no uso da radiação. Marchão et al., (2006) observaram que existe correlação positiva entre a densidade de plantas e a interceptação da radiação solar fotossinteticamente ativa. Esse resultado indica que o adensamento da cultura permite maior rendimento de grãos em decorrência do aumento linear da interceptação pelo dossel.

Entretanto, o índice de área foliar (IAF) que determina a taxa máxima de crescimento é conhecido como IAF crítico, o qual varia em função do ambiente que a planta estiver submetida. O IAF crítico para a cultura do milho oscila entre valores de 3 a 5, de acordo com a região, híbridos e sistema de produção considerados (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004). Para manifestação da capacidade produtiva, é necessário que a planta apresente de 85 a 90 % do IAF crítico. A escolha adequada do arranjo das plantas é uma das práticas de manejo mais importantes para otimizar o rendimento de grãos de milho, pois afeta diretamente a interceptação de radiação solar, que é um dos principais fatores determinantes da produtividade. A redução de 50% da radiação incidente no período compreendido entre 15 dias antes e 15 após a antese provocou a redução de 40 a 50% da produtividade de grãos de milho (ANDRADE, 1992). A redução da radiação interceptada é simplesmente devido à diminuição da área foliar, que conseqüentemente aumenta a radiação transmitida pelo dossel (FERREIRA JUNIOR, 2010).

Outro aspecto que influencia os processos fisiológicos das plantas e interfere nos estádios de desenvolvimento dos vegetais é a temperatura do ar. Além disso, as plantas apresentam uma temperatura mínima abaixo da qual interrompem suas atividades fisiológicas (temperatura base), uma faixa satisfatória de temperatura para seu desenvolvimento adequado e uma temperatura máxima efetiva acima da qual a taxa respiratória supera a produção de fotoassimilados (temperatura superior). Devido ao aumento da taxa de desenvolvimento com a temperatura, o ciclo de determinadas espécies, mensurado pelo calendário, é menor em época quente do que fresca e, numa mesma época, é relativamente menor num período quente. Em vez do número de dias, a soma de graus-dia (acúmulo térmico) que a planta necessita para completar parte ou todo o ciclo tem sido utilizada para caracterizar o ciclo de vida das plantas. Para espécies C3 temperadas, a temperatura base é 0 °C, enquanto que para espécies C4 e plantas C3 tropicais corresponde a 10 °C (MONTEITH & ELSTON, 1996).

Contudo, a profundidade de enraizamento de uma cultura é local e específica, depende da física do solo (resistência mecânica, temperatura do solo, entre outros) e das características químicas. A profundidade efetiva é definida como a profundidade do solo onde a proliferação de raízes é suficiente para permitir a absorção significativa de água para cultura. Sob condições ideais, sem restrições no solo, o aprofundamento máximo da raiz pode ser alcançado perto do final do ciclo de vida da cultura. Caso ocorra a presença de uma camada restritiva do solo, que impeça o crescimento radicular, as raízes devem se aprofundar normalmente até a camada restritiva a ser atingida, e então retarda ou deixa de aprofundar-se completamente (STEDUTO et al., 2009).

Todavia, o desenvolvimento e a produção da maioria das espécies vegetais cultivadas são afetados negativamente quando submetidas a solos mal drenados, devido à falta de oxigênio livre (VARTAPETIAN & JACKSON, 1997). A extensão de danos decorrentes do encharcamento do solo depende de vários fatores, incluindo a duração do período de saturação, o estágio de desenvolvimento da planta e as demais condições ambientais. Para a cultura do milho, as reduções na produtividade de grãos em áreas encharcadas são mais pronunciadas quando o estresse ocorre no início do estágio vegetativo (MUKHTAR et al., 1990).

O ambiente atmosférico da cultura no AquaCrop é descrito pela componente “clima”, necessitando dos valores diários da temperatura máxima e mínima do ar, precipitação pluvial, evpotranspiração de referência e concentração anual média de dióxido de carbono. O dossel é uma característica importante no modelo, pois através da sua expansão, condutância e senescência determinam a quantidade de biomassa produzida. O sistema radicular é simulado

através da profundidade efetiva das raízes e dos seus padrões de extração de água, considerando uma profundidade inicial de 0,2 a 0,3 m para o cálculo do balanço hídrico.

2.4 Modelagem na agricultura

Modelo pode ser definido como a representação simplificada de um sistema, enquanto simulação é a arte de construir modelos (WIT, 1982). A simulação é uma ferramenta útil para prever resultados de ensaios ou ações, que não podem ser testados experimentalmente. Os modelos podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. O primeiro é quando dadas às condições de experimentação pode-se prever o resultado final do experimento, enquanto que o último não é possível prever, com certeza, o resultado antes da realização do experimento. Whisler et al. (1986) ordenaram em três categorias básicas as razões para construção de modelos: (a) como auxílio na interpretação de resultados experimentais; (b) como ferramenta à pesquisa agrônômica e (c) como ferramenta de desenvolvimento agrônômico. Segundo os mesmos autores, muitos modelos de cultivo ou parte deles foram construídos para ajudar o pesquisador a entender a operação de alguma parte de um sistema agrônômico, como o fluxo de água no solo, controle de abertura e fechamento dos estômatos, movimento de nutrientes no solo e o crescimento e desenvolvimento de uma cultura. No final da década de 60 vários grupos de pesquisa iniciaram os estudos sobre a modelagem de simulação de culturas, visando principalmente à integração dos conhecimentos fisiológicos (BROUWER & DE WIT, 1969).

Nas últimas décadas, modelos detalhados e avançados foram construídos, alguns deles voltados principalmente à escala de plantas individuais, tais como CERES (JONES & KINIRY, 1986) e outros ao nível de copa, como EPIC (WILLIAMS et al., 1989), sua derivação ALMANAQUE (KINIRY et al., 1992) e o CropSyst (STOCKLE et al., 2003), servindo como ferramenta de gestão para auxiliar na tomada de decisão. Tais modelos simulam o crescimento e desenvolvimento das plantas, usando variáveis como a fotossíntese, respiração, produção de biomassa, produtividade de grãos e outros.

O sistema computacional DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), inclui um conjunto de modelos de crescimento de culturas, que tem sido usado por muitos pesquisadores em diversas condições climáticas e de solo, constituindo uma ótima alternativa à obtenção de informações necessárias para elaboração de planejamento agrícola (JONES et al., 2003). No entanto, a maioria desses modelos é extremamente sofisticada, e

necessita de habilidades avançadas para sua calibração e operação. Além disso, requer grande número de variáveis referentes à cultura ou cultivar específica, que não são facilmente medidos e acessíveis aos usuários finais (HENG et al., 2009).

Dependendo da finalidade e objetivos da modelagem de cultura, podem-se distinguir duas principais abordagens: científica e de engenharia. A modelagem científica aponta principalmente a melhorar nossa compreensão sobre o comportamento das culturas, sua fisiologia e suas respostas às mudanças ambientais, enquanto que a modelagem de engenharia oferece consultoria de gestão ou previsões para decisões futuras (PASSIOURA, 1996). A modelagem científica é também destinada a ser mais mecanística, baseada em leis e teorias sobre os processos que regem o sistema, enquanto os modelos de engenharia são feitos para serem funcionais com base em uma combinação de teorias robustas e relações empíricas (ADDISCOTT & WAGENET, 1985). Apesar disso, a modelagem está ainda em estágio inicial de desenvolvimento, uma vez que muitos modelos simulam apenas os principais fatores que afetam as culturas, como por exemplo, clima, água, disponibilidade de nitrogênio no solo e carbono para fotossíntese. Avanços na modelagem poderão incluir novos componentes como efeitos do preparo do solo, pragas, doenças, plantas daninhas, salinidade, excesso de água entre outros (JAME & CUTFORTH, 1996).

O AquaCrop (RAES et al., 2009), versão 3.0, incorpora os conhecimentos atuais das respostas fisiológicas das culturas em uma ferramenta que pode prever a biomassa e a produtividade das plantas cultiváveis em resposta a água disponível. O modelo abrange uma ampla variedade de culturas herbáceas, incluindo as forrageiras, hortaliças de folhas, grãos, frutas, raízes e tubérculos. O modelo estabelece equilíbrio entre precisão, simplicidade, robustez e facilidade de uso, sendo destinado a usuários práticos, tais como especialistas em extensão, gestores de recursos hídricos, economistas e especialistas em políticas públicas que utilizam modelos simples para planejamento e análise de cenário (HSIAO et al., 2009). Como em outros modelos, a estrutura do AquaCrop no continuum solo-planta-atmosfera, apresenta o solo com o balanço hídrico, a planta com seu crescimento, desenvolvimento e processos de produção e a atmosfera (chuvas, demanda evaporativa e concentração de dióxido de carbono). Além disso, alguns aspectos de manejo são apresentados, com ênfase na irrigação, níveis de fertilidade do solo que afetam o desenvolvimento das culturas, produtividade de biomassa em relação ao uso da água, ajustes das culturas ao estresse hídrico e, portanto, o rendimento final. Pragas e doenças não são consideradas.

Algumas características distinguem o AquaCrop dos outros modelos, tais como: a) a escala de tempo, com medidas diárias, sendo um período próximo para se aproximar da escala

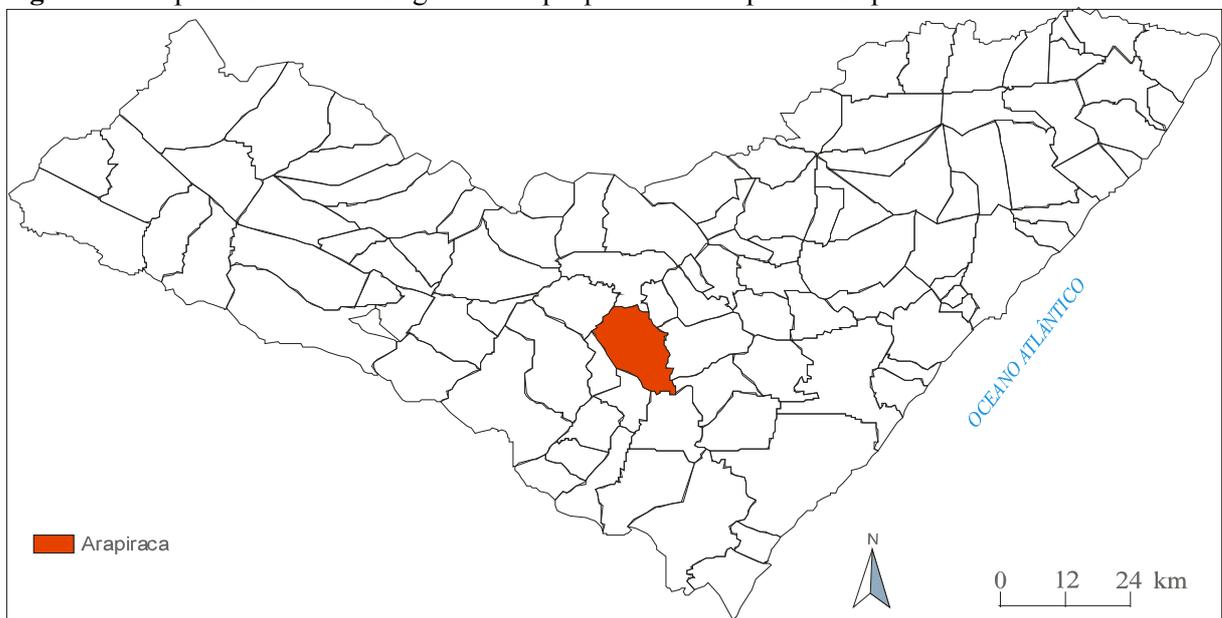
de tempo da resposta da cultura ao deficit hídrico, b) não há separação de biomassa entre os vários órgãos da planta, esta distinção evita lidar com a complexidade e as incertezas associadas aos processos de separação, que permanecem entre os menos entendidos e mais difíceis de modelar, c) o desenvolvimento da folhagem da cultura é expressa através da cobertura do dossel (CD) e não através do índice de área foliar (IAF), a CD introduz uma simplificação significativa na simulação, consolidando o crescimento expansivo da folha, ângulo e distribuição para uma função de crescimento global, o que permite ao usuário inserir valores observados da CD e d) o uso da produtividade de biomassa padronizada em relação ao uso da água (WP) para demanda evaporativa atmosférica e concentração de CO₂, que conferem ao modelo extensa capacidade de extrapolação, para diversas localidades, estações e clima, com possibilidade de inclusão de cenários climáticos futuros (STEDUTO et al., 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Dados experimentais utilizados nas simulações

O experimento de campo foi instalado e conduzido por Medeiros (2008), em área agrícola, situada às margens da Rodovia AL 115, no povoado Batingas, município de Arapiraca - AL ($09^{\circ} 48' 55,1''$ S, $36^{\circ} 36' 22,8''$ W e 236 m, Figura 1), no período de maio a outubro de 2008.

Figura 1 - Mapa do Estado de Alagoas destaque para o município de Arapiraca.



(Fonte: LEITE, 2009)

Os dados da cultura foram obtidos de observações fenológicas da variedade AL Bandeirantes, desenvolvida pelo Departamento de Sementes, Mudas e Matrizes da CATI, apresentando características comerciais tais como: ciclo semiprecoce, altura média das plantas de 2,30 m, tipo semiduro, boa resistência ao acamamento, coloração do grão alaranjada, florescimento entre 62 a 63 dias e produtividade em torno de 7 t ha^{-1} .

O experimento abrangeu quatro épocas de semeadura, sendo três compreendidas dentro do período recomendado pelo zoneamento climático do Ministério da Agricultura para a cultura do milho, em Alagoas e um tardio, em que a semeadura ocorreu dez dias após a data

limite preconizada pelo zoneamento. A Tabela 1 mostra as quatro épocas de semeio, datas de plantio e fases fonológicas (emergência, florescimento e maturidade).

Tabela 1 - Épocas de semeadura, datas de plantio e fases fonológicas (Emergência, Florescimento e Maturidade) para cultura do milho na região de Arapiraca- AL, 2008.

Época de semeadura	Data de Plantio	Emergência	Florescimento *DAP	Maturidade
1 ^a	06/ 05/ 2008	11/ 05	59	113
2 ^a	19/ 05/ 2008	24/ 05	61	115
3 ^a	10/ 06/ 2008	15/ 06	59	113
4 ^a	30/ 06/ 2008	05/ 07	61	112

Fonte: (Autor, 2011) *DAP- Dias após o plantio.

3.2 Ambientes atmosféricos e solo

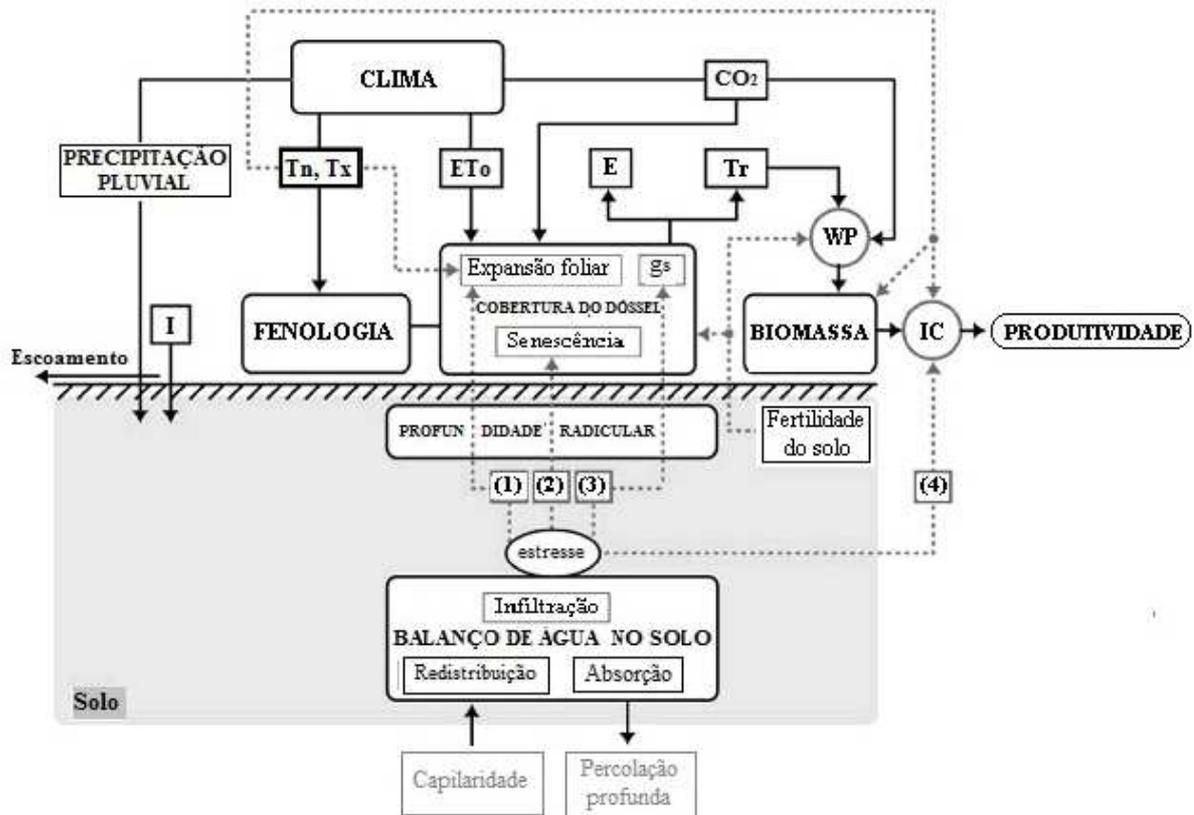
As variáveis de entrada de tempo necessário para executar o modelo como: temperatura do ar máxima e mínima diária, precipitação pluvial, evapotranspiração de referência (ET_o) foram salvos no software WordPad[®] sendo recuperadas pelo modelo através da interface do usuário. Os dados meteorológicos foram coletados de uma estação agrometeorológica com sistema de aquisição automática CR10X (Campbell Scientific, Logan, Utah) localizada em área próxima ao experimento, provida de unidade armazenadora de dados e placa de modem para captura de dados a distância, maiores detalhes consultar Medeiros (2008). O AquaCrop usa como referência a concentração média anual de CO₂ atmosférico para o ano 2000 (369,47 ppm= 716,0 mg m⁻³) registrados no Observatório do Mauna Loa no Havaí (RAES et al., 2011) e ajustado pelo modelo para o ano simulado.

Os arquivos de saída contêm informações diárias sobre desenvolvimento e produção das culturas, umidade do solo em várias profundidades, conteúdo de água na zona radicular, balanço hídrico do solo e necessidade de irrigação. Os mesmos, foram organizados em planilhas do Microsoft Office Excel 2003[®] e posteriormente transferidos ao Microcal Origin (versão 6)[®] para construção dos gráficos.

A Figura 2 representa o esquema de funcionamento do AquaCrop, indicando os principais componentes do continuum solo-planta-atmosfera tais como: clima (precipitação pluvial, temperatura máxima (T_x) e temperatura mínima (T_n), evapotranspiração de referência (ET_o) e concentração de dióxido de carbono), fenologia, cobertura do dossel (CD), evaporação do solo (E), transpiração do dossel (Tr), irrigação (I), índice de colheita (IC), produtividade de biomassa em relação ao uso da água (WP), fertilidade do solo, escoamento,

profundidade do sistema radicular, infiltração, capilaridade, percolação profunda, absorção. Estresse hídrico afetando a expansão foliar [1], a senescência do dossel [2], condutância estomática (g_s) [3] e o índice de colheita (IC) [4].

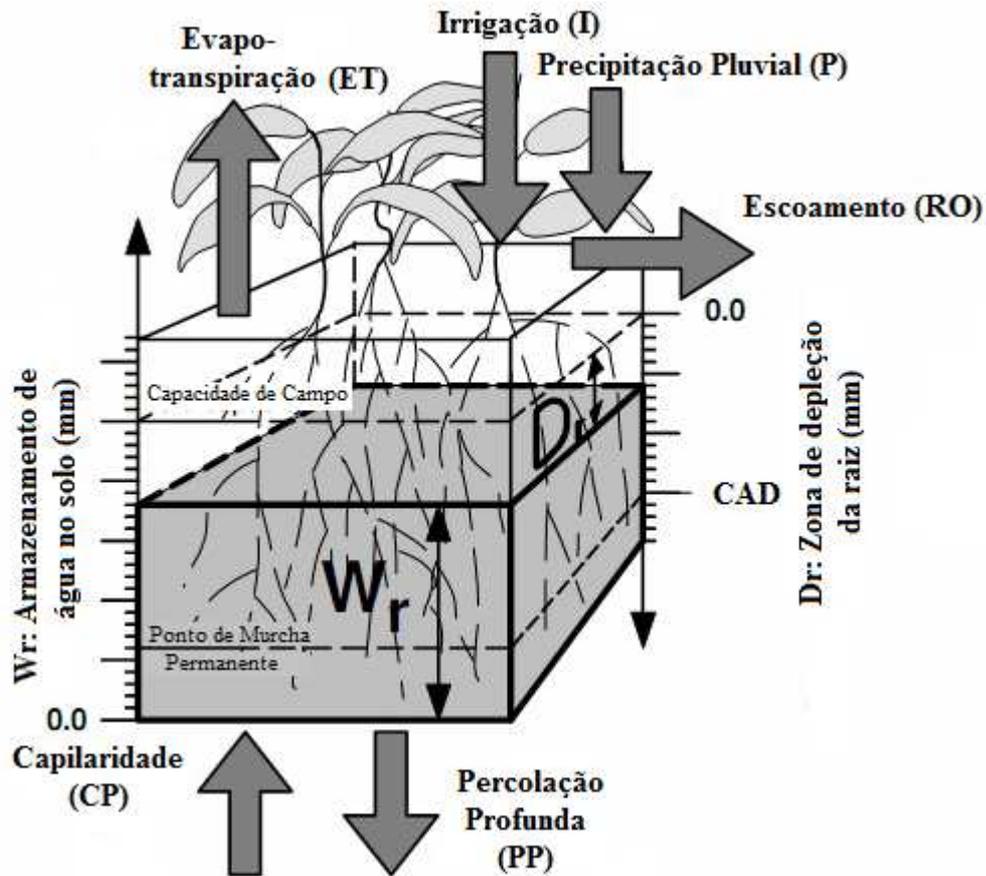
Figura 2 - Esquema do AquaCrop com indicação das principais componentes do continuum solo-planta-atmosfera (adaptado de RAES et al., 2011).



De maneira esquemática, a zona de raiz pode ser considerado como um reservatório, Figura 3. Ao manter a faixa dos fluxos de água que entra e sai dos limites da zona de raiz, a quantidade de água retida na zona radicular pode ser calculada em qualquer momento da estação por meio de um balanço hídrico do solo (STEDUTO et al., 2009). De forma simplificada, os procedimentos para cálculo do balanço hídrico são apresentados no Anexo B, maiores detalhes estão disponíveis no Manual do AquaCrop (RAES et al., 2011).

A Tabela 2 mostra as características do perfil do solo (arquivo de entrada), necessários ao AquaCrop, como: camada, textura, conteúdo volumétrico de água na saturação, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e condutividade hidráulica saturada (K_{sat}). Estes valores foram obtidos a partir de medições de campo realizadas por Medeiros (2008), em área cultivada no Povoado Batingas-Arapiraca/AL.

Figura 3 - A zona de raiz como reservatório de água do solo (adaptado de RAES et al., 2009).



O conteúdo inicial de água no solo para 1^a, 2^a e 3^a época de semeio foi definido no AquaCrop em seis partes (1^a e 2^a camada) de 0,10 m de espessura. Entretanto, para a 4^a época de semeio o perfil do solo foi dividido em oito partes (0,10 m de espessura), sendo necessário ajustar os valores do armazenamento de água no solo, uma vez que a umidade medida para as quatro épocas de semeadura através da Reflectometria de Domínio de Tempo (TDR- CS616, Campbell Scientific, Logan, Utah) no campo foi calibrado em 0,60 m de profundidade.

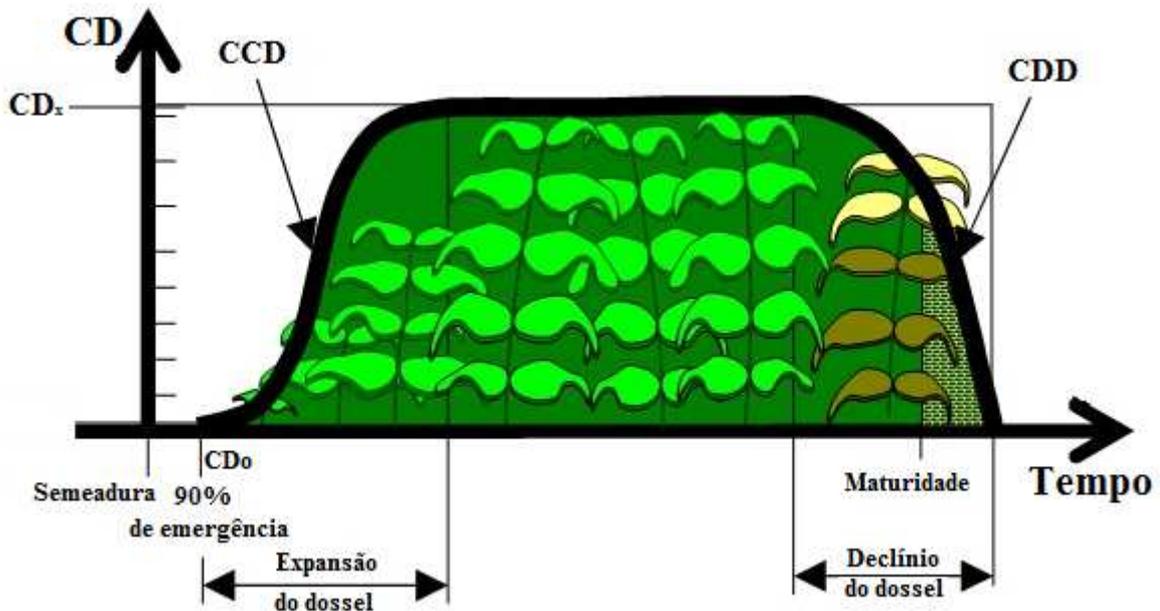
Tabela 2 - Propriedades do solo [camadas, textura, profundidade, ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de campo (CC), saturação e condutividade hidráulica saturada (K_{sat})], para área de cultivo de milho no Povoado Batingas, Arapiraca-AL, 2008.

Camadas	Textura	Profundidade (m)	PMP	CC $m^3 m^{-3}$	Saturação	K_{sat} mm d ⁻¹
1 ^a	Areia franca	0,00-0,30	0,063	0,111	0,405	250
2 ^a	Franco argiloarenosa	0,30-0,60	0,081	0,145	0,390	250

Fonte: (Autor, 2011)

A Figura 4 mostra o ciclo completo de desenvolvimento da cultura sob condições não estressantes, compostas pela cobertura inicial do dossel (CD_0), coeficiente de crescimento do dossel (CCD), cobertura máxima do dossel (CD_x) e coeficiente de declínio do dossel (CDD). As equações para obtenção da CD_0 , CCD, CD_x e CDD são apresentadas de forma simplificada no Anexo C.

Figura 4 - Variação da cobertura do dossel (CD) durante todo o ciclo da cultura sob condições não-estressantes (adaptado de RAES et al., 2011).



3.3 Parâmetros conservadores e da cultura

Os parâmetros chamados de conservadores são aqueles que não mudam substancialmente com o tempo, tais como, práticas de manejo do solo ou localização geográfica. As características fenológicas (parâmetros específico da cultura) são calibrados com dados da planta cultivada em condições favoráveis e não limitantes, mas continuam a ser aplicadas sob condições de estresse através de sua modulação por funções de resposta ao deficit hídrico. A Tabela 1-Anexo D, mostra os parâmetros conservadores e específicos da cultura utilizados na simulação através do AquaCrop.

3.4 Cálculo da Biomassa

O modelo AquaCrop (RAES et al., 2011) é típico de engenharia, focado principalmente em simular a biomassa e a produtividade das plantas cultiváveis em resposta a água disponível. Segundo Steduto et al. (2009), o AquaCrop evoluiu de uma aproximação do modelo de Doorenbos & Kassam (1979), em que a relação da evapotranspiração (ET) é fundamental no cálculo do rendimento (Y). O AquaCrop progrediu por: (a) separar a ET em transpiração da cultura (Tr) e evaporação de água do solo (E); (b) desenvolvimento de um modelo simples que refletisse o crescimento e senescência do dossel como base para estimar a transpiração e (c) dividir os efeitos do estresse hídrico em quatro componentes: crescimento do dossel, senescência da copa, transpiração e índice de colheita. O AquaCrop é representado por uma função linear simples como:

$$Y = B IC \quad (1)$$

em que, Y é o rendimento da cultura (kg ha^{-1}), B é a biomassa total (kg ha^{-1}) e IC é o índice de colheita (%). A produção diária de biomassa (g m^{-2} ou t ha^{-1}) acima do solo é dada por:

$$m_i = K_{s_b} WP_i^* \left(\frac{Tr_i}{ET_{o_i}} \right) \quad (2)$$

em que, K_{s_b} é um fator de ajuste para temperatura do ar em função dos graus-dia (a depender do número de graus-dia gerados em um dia, K_{s_b} pode variar entre 0 e 1); WP_i^* é a produtividade de biomassa diária padronizada em relação ao uso da água para cultura do milho ($33,7 \text{ g m}^{-2}$ ou $0,337 \text{ t ha}^{-1}$ por milímetro transpirado, RAES et al., 2009); Tr_i é a transpiração diária da cultura no dia i (mm d^{-1}) calculada pelo AquaCrop, e, ET_{o_i} é a evapotranspiração de referência diária (mm d^{-1}) calculada pelo método de Pennam-Monteith parametrizado no boletim FAO56 (ALLEN et al., 1998). O cálculo da produção total de biomassa (t ha^{-1}) acima do solo é representado pela equação:

$$B = K_{s_b} WP^* \sum \left(\frac{Tr}{ET_o} \right) \quad (3)$$

Onde, ajustes da WP^* para concentração de CO_2 atmosférico, produtos sintetizados e fertilidade do solo são descrito por Raes et al. (2011). No Anexo A, são incluídos de maneira

simplificada as equações utilizadas no cálculo dos ajustes da WP e IC, como também as sub-rotinas de obtenção da evapotranspiração através do balanço hídrico, o detalhamento das mesmas estão no manual do modelo (RAES et al., 2011).

3.5 Análise dos dados

Para produção total de biomassa, produtividade de grãos e armazenamento de água no solo foram realizadas as seguintes avaliações estatísticas:

3.5.1 Índice de Concordância

A aproximação dos dados estimados aos observados pode ser avaliada pelo afastamento ou aproximação dos pontos. Para quantificar matematicamente essa aproximação foi desenvolvido por Willmont (1981) um coeficiente designado concordância, representado pela letra “d”, que expressa a exatidão dos valores estimados em relação aos observados, variando de zero, que indica nulidade, a 1 que indica perfeita exatidão.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S'_i| + |M'_i|)^2} \right] \quad (4)$$

em que, N é o número de observações; S_i é o valor estimado; M_i é o valor observado; S'_i é o valor estimado, menos a média da variável observada; M'_i é o valor observado, menos a média da variável observada.

3.5.2 Coeficiente de Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação mede o grau de associação linear entre duas variáveis aleatórias, ou seja, indica até que ponto os valores de uma variável estão relacionados com os valores de outra variável. A correlação pode ser denominada positiva ou negativa. Quando positiva há a variação positiva da variável dependente (Y), quando há variação positiva da variável independente (X) e vice-versa. Quando negativa há a variação negativa de Y, quando há variação positiva de X e vice-versa (RODRIGUES, 2008).

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{N}}{(N-1) s_X s_Y} \quad (5)$$

em que, r é o coeficiente de correlação de Pearson; $\sum XY$ é a soma dos produtos entre os valores de X e Y; $\sum X \sum Y$ é o produto da soma dos valores de X e Y; N é o número de observações; s_X é o desvio padrão dos valores de x e o s_Y é o desvio padrão dos valores de y .

3.5.3 Índice de confiança

O índice de confiança (CAMARGO & SENTELHAS, 1997) é utilizado para indicar o desempenho dos métodos, reunindo o coeficiente de correlação “ r ” e o índice de concordância “ d ”. O índice de confiança é designado pela letra “ c ”, o qual é definido como:

$$c = r d \quad (6)$$

A Tabela 3 representa o critério de interpretação do desempenho do modelo AquaCrop pelo índice de confiança.

Tabela 3 - Critério de interpretação do desempenho do modelo AquaCrop, pelo índice “ c ”.

Valor de “ c ”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: (CAMARGO & SENTELHAS, 1997)

3.5.4 Porcentagem de Desvio

A porcentagem de desvio (PD) foi utilizada para indicar subestimativa (desvio negativo) e superestimativa (desvio positivo), entre os valores simulados e observados (TOJO SOLER, 2004). A porcentagem de desvio é dada por:

$$PD = \frac{(S_i - M_i)}{M_i} 100 \quad (7)$$

3.5.5 Raiz Quadrada do Erro Médio

A Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) é usado para mensurar a performance geral do modelo e sintetiza a diferença média entre os valores observados e estimados. A unidade da RMSE é a mesma utilizada pelas variáveis observadas e estimadas. O modelo é melhor ajustado quando a RMSE se aproxima de zero (LOAGUE & GREEN, 1991).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2} \quad (8)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Armazenamento de água no solo

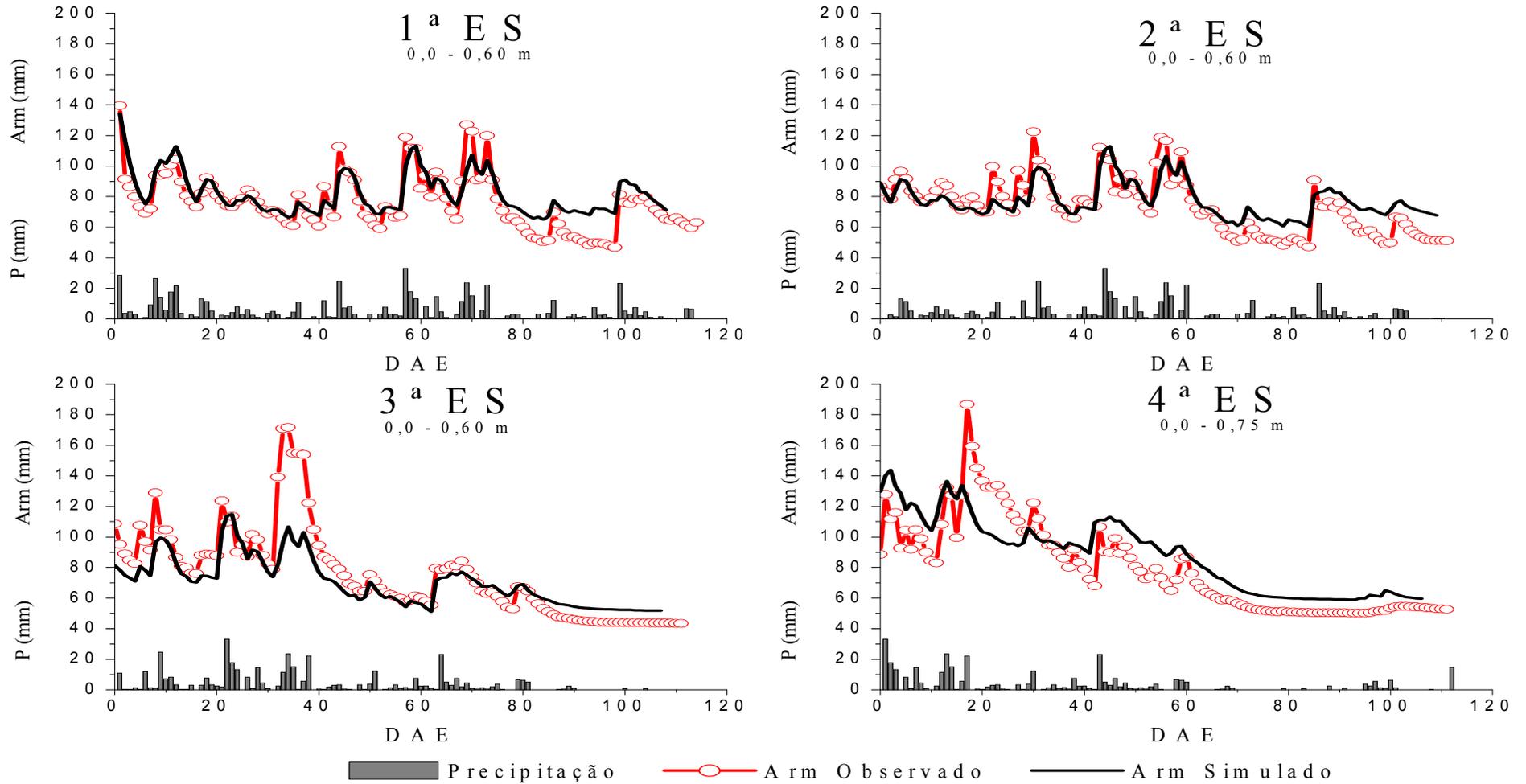
Os resultados são apresentados e discutidos por épocas de semeadura, em que foram comparados valores simulados e observados do armazenamento de água no solo, biomassa acumulada nos intervalos ao longo do ciclo vegetativo, biomassa final e rendimento de grãos.

A precipitação pluvial e o armazenamento de água no solo (Arm) simulado e observado em relação aos dias após a emergência (DAE), para quatro épocas de semeadura da cultura do milho na região de Arapiraca, são apresentados na Figura 5. Durante o ciclo da cultura do milho para primeira época de semeio, ocorreram chuvas em 90,27% dos dias, com total de 567,67 mm e intensidade média de 5,02 mm d⁻¹. A segunda época de semeadura apresentou total pluviométrico de 467,60 mm, e média diária de 4,07 mm, sendo observadas chuvas em 82,61% do ciclo. Para a terceira época de semeio a precipitação pluvial total foi de 385,56 mm, concentrando a maior parte das chuvas (97,63%) até os 79 DAE, com intensidade média de 3,41 mm d⁻¹. Todavia, para quarta época de semeadura registrou-se a ocorrência de chuvas em 61,61% dos dias, com total de 308,09 mm e intensidade média de 2,75 mm d⁻¹ (Figura 5). A mesma não supriu a quantidade mínima exigida pela cultura, onde Fancelli e Dourado Neto (2004) afirmam que a cultura do milho exige mínimo de 350 mm de precipitação, sem que haja necessidade da prática de irrigação.

Para as quatro épocas de semeio, os resultados do armazenamento de água no solo simulados pelo modelo AquaCrop apresentaram tendência de variação similar aos valores observados (Figura 5). Porém, para terceira época de semeadura o armazenamento observado apresentou valor máximo (171,66 mm) aos 35 DAE, enquanto que o valor máximo simulado (115,0 mm) ocorreu aos 24 DAE. Para a quarta época de semeio, a profundidade do solo foi ajustada em 0,75 m, no qual o armazenamento observado apresentou valor máximo de 186,84 mm aos 18 DAE e mínimo de 50,08 mm aos 95 DAE. Entretanto, para a mesma época de semeio o modelo simulou o armazenamento máximo (143,8 mm) aos 3 DAE, e mínimo (59,0 mm) aos 93 e 94 DAE.

Para as três primeiras épocas de semeadura, o conteúdo de água no solo observado em função do simulado é superestimado a partir dos 70 DAE em 0,93%, 0,83% e 1,02%, respectivamente. Todavia, a quarta época de semeio é superestimada em 0,8% a partir dos 33 DAE e se estende até o final do ciclo da cultura. Segundo Hsiao, et al., (2009), um dos

Figura 5 - Precipitação pluvial observada (barras), armazenamento de água (Arm) no solo simulado (linha cheia) e observado (linha cheia com círculo aberto), para quatro épocas de semeadura de milho na região de Arapiraca-AL, 2008.



Fonte: (Autor, 2011)

motivos para essa superestimação é a hipótese simplificadora do AquaCrop, onde a drenagem é zero quando o conteúdo de água no solo é igual ou inferior a cobertura do dossel. Conforme os mesmos autores, as variações espaciais das características da água no solo podem ser responsáveis por algumas das discrepâncias, desde que o mesmo conjunto de características da água no solo foi aplicado em todas as simulações.

Para as três primeiras épocas de semeio o AquaCrop não registrou nenhum tipo de estresse hídrico, que afetasse a expansão foliar ou induzisse ao fechamento estomático provocando a senescência precoce da copa. Todavia, a 4ª época de semeio o modelo simulou em 8% o estresse hídrico para expansão foliar no início do florescimento (57 DAE). O estresse hídrico com indução ao fechamento estomático, bem como, provocando a senescência precoce da copa, iniciou aos 70 DAE, e mostrou máxima eficiência (100%) aos 85 DAE.

A Tabela 4 apresenta as quatro épocas de semeadura, os totais de armazenamento de água no solo (observado e simulado), *d* Willmont e raiz quadrada do erro médio (RMSE), para cultura do milho na região de Arapiraca- AL, 2008. O armazenamento total de água no solo através da porcentagem de desvio (TOJO SOLER, 2004), apresentou-se subestimado para a 1ª e 2ª época de semeadura com -6,6% e -4,25%, respectivamente. Para a 3ª e 4ª época de semeadura os valores do armazenamento total ficaram superestimados em 8,66% e 2,69%, respectivamente.

A aproximação dos dados pelo *d* de Willmont (Tabela 4), apresentou melhor exatidão na 4ª época de semeadura (0,99), e menor exatidão para 3ª época de semeadura (0,84). Utilizando a RMSE, o modelo apresentou melhor ajuste para 2ª época de semeadura (10,29 mm), e menor ajuste para 4ª época de semeadura (18,35 mm).

Tabela 4 - Época de semeadura, armazenamento de água no solo, *d* Willmont e raiz quadrada do erro médio (RMSE), para cultura do milho na região de Arapiraca-AL, 2008.

Época de semeadura	Armazenamento de Água		<i>d</i>	RMSE
	Observado	Simulado		
Σmm.....			mm
1ª	8.868,50	8.282,40	0,89	10,37
2ª	8.524,00	8.161,48	0,86	10,29
3ª	7.633,00	8.294,17	0,84	17,47
4ª	6.743,10	6.925,12	0,99	18,35

Fonte: (Autor, 2011)

A Figura 1 (Anexo B), apresenta a transpiração máxima (Trx), transpiração real (Tr), evaporação máxima (Ex), evaporação real (E), drenagem (Dr) e escoamento superficial (Esc),

simulado pelo modelo AquaCrop para quatro épocas de semeadura de milho na região de Arapiraca-AL, 2008.

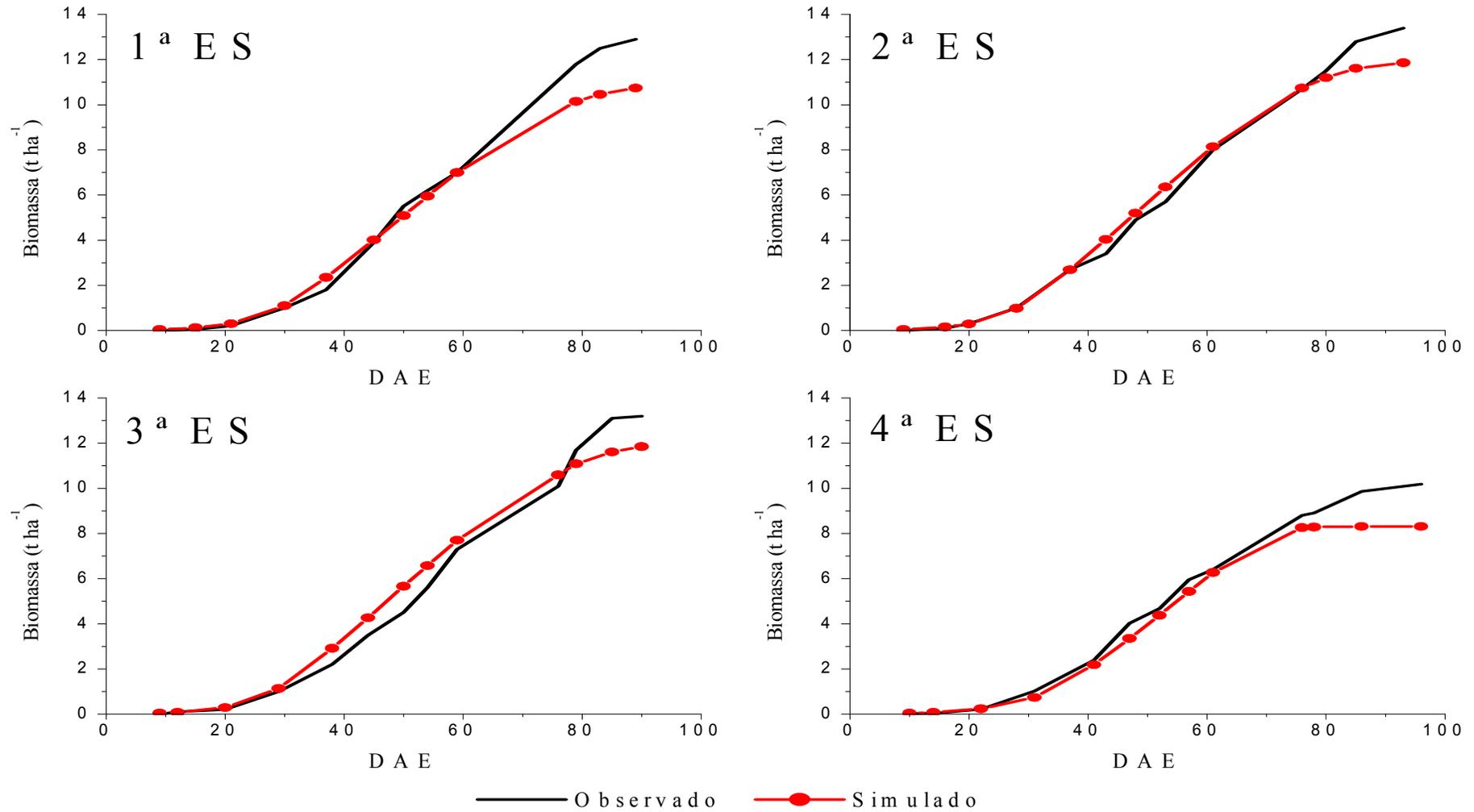
4.2 Biomassa Total e Produtividade de grãos

Os resultados simulados e observados da biomassa aérea em função dos dias após a emergência (DAE) (Figura 6). Um ajuste perfeito entre os valores simulados e observados para produção de biomassa foi observado dos 9 aos 30 DAE, para as quatro épocas de semeadura. Esta tendência também foi verificada por Costa & Barros (2001), quando do desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho, cultivar BR 3056, em praticamente toda distribuição da matéria seca para as diversas partes da planta do 0 aos 30 DAE. Para períodos acima dos 30 DAE, conforme Hunt apud Costa & Barros (2001), as variações de crescimento são mais intensas e os processos físicos e biológicos são mais complexos de serem estimados.

Para a primeira época de semeio (Figura 6), os valores simulados ($2,35 \text{ t ha}^{-1}$ e $4,01 \text{ t ha}^{-1}$) são maiores que os observados ($1,8 \text{ t ha}^{-1}$ e $3,9 \text{ t ha}^{-1}$) dos 37 aos 45 DAE. A partir dos 62 DAE os valores observados superaram os valores estimados em 1,2%, essa tendência prolongou-se até o final do ciclo da cultura devido o modelo finalizar a simulação de biomassa aos 91 DAE, enquanto que acúmulo de biomassa observada no campo aumentar até o ponto de maturidade fisiológica (108 DAE). Fancelli & Dourado Neto (2004), concluíram que o ponto de maturidade fisiológica caracteriza o momento ideal para colheita, função da máxima produção (máxima massa de matéria seca). Para a segunda época de semeadura, dos 43 aos 61 DAE os resultados simulados ($4,04 \text{ t ha}^{-1}$ e $8,14 \text{ t ha}^{-1}$) pelo modelo foram superiores aos observados ($3,4 \text{ t ha}^{-1}$ e $8,0 \text{ t ha}^{-1}$), de maneira que, a razão entre os valores observados e estimados variou em 1,13%.

Dos 38 aos 76 DAE, para a terceira época de semeio os valores simulados ($2,91 \text{ t ha}^{-1}$ e $10,6 \text{ t ha}^{-1}$) de biomassa ficaram acima dos observados ($2,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $10,1 \text{ t ha}^{-1}$), e apresentou variação dos observados em função dos simulados de 1,12%. O acúmulo de biomassa simulado pelo AquaCrop para segunda e terceira época de semeio finalizou aos 92 DAE, entretanto, os valores observados aumentaram até a maturidade fisiológica. Para a quarta época de semeio verificou-se que a partir dos 31 DAE o valor de biomassa simulada ($0,74 \text{ t ha}^{-1}$) ficou abaixo do observado ($1,02 \text{ t ha}^{-1}$).

Figura 6 - Biomassa acumulada simulada (linha com círculo fechado) e observada (linha cheia), para quatro épocas de semeadura de milho na região de Arapiraca-AL, 2008.



Fonte: (Autor, 2011)

A penalização imposta pelo modelo em função do deficit hídrico acelerou o processo de senescência. Para a referida semeadura, o AquaCrop estabilizou a produção de biomassa aos 84 DAE ($8,3 \text{ t ha}^{-1}$), enquanto que os resultados observados em campo se estenderam até os 96 DAE ($10,2 \text{ t ha}^{-1}$), apresentando variação entre observado e simulado de 1,23% até o final do ciclo. Caverro et al. (2000), observou que a discrepância entre os resultados medidos e simulados nos tratamentos com estresse hídrico, ocorreu devido à profundidade variável do sistema radicular. Experimentos realizados com milho em Zaragoza, Espanha, por Heng et al (2009) para testar o AquaCrop, verificaram que a variabilidade espacial do solo pode causar algumas diferenças nos valores medidos, especialmente nos tratamentos com estresse hídrico.

Os valores de biomassa total (simulado e observado), rendimento de grãos (simulado e observado) e porcentagem de desvio (%) da cultura do milho para quatro épocas de semeio na região de Arapiraca-AL, são apresentados na Tabela 5. Comparando a biomassa total simulada com a total observada, a 2ª e 3ª época de semeio mostra porcentagem de desvio (TOJO SOLER, 2004) baixa ou menor que 10%, entretanto, para 1ª e 4ª época de semeio a porcentagem de desvio foi considerada alta ou maior que 10%. Para a produção de biomassa final (kg ha^{-1}) os valores máximos e mínimos observados (simulados) variaram entre 13.059 (11.861) e 9.873 (8.306) para 3ª e 4ª época de semeadura, respectivamente. Em testes realizados por Hsiao et al. (2009), com milho em Davis, Califórnia, utilizando o AquaCrop, valores subestimados (1,06%) de biomassa foram obtidos em tratamentos com irrigação. Segundo os mesmos autores a subestimação da biomassa deve ter ocorrido em função dos baixos valores de entrada para produtividade de água padronizada e coeficiente de cultura.

Para o rendimento de grãos (Tabela 5), os valores simulados apresentaram porcentagem de desvio baixo ou menores que 5% para as três primeiras épocas de semeadura, todavia, para a 4ª época de semeio a porcentagem de desvio foi um pouco maior que 5%. A produtividade de grãos simulada ficou entre 4.406 e 2.069 kg ha^{-1} , para a 3ª e 4ª época de semeadura, respectivamente, subestimando em 2,0% (3ª ES) e superestimando em 5,1 % (4ª ES). A superestimativa da 4ª época de semeadura deve-se ao ajustamento da profundidade do sistema radicular em 0,75 m, em que para as demais épocas de semeadura a profundidade considerada foi 0,60 m (MEDEIROS et al., 2008). Bonnacerrere et al. (2007), estimando a produtividade potencial e deplecionada da cultura do milho no estado do Rio Grande do Sul, utilizando um modelo modificado de De Wit (1965), verificou que em condições sem estresse hídrico para oito épocas de semeadura os resultados de produtividade foram praticamente homogêneos. Situação inversa encontrou Matzenauer et al (1995), utilizando análise de regressão em experimentos realizados em vários locais e anos para a cultura do milho no

estado do Rio Grande do Sul, concluíram que a deficiência hídrica é a variável mais eficiente para indicar as variações de produtividade de grãos de milho entre épocas de semeadura, anos e locais no estado. Tojo-Soler et al. (2001), utilizando o modelo Ceres-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho safrinha para região sudoeste do Estado de São Paulo, representada pela localidade de Manduri, para dois experimentos irrigado e não-irrigado observou que, quando se atrasou a época de semeadura, o rendimento simulado foi menor, isso é devido às condições climáticas adversas para cultura quando é atrasada a semeadura, principalmente menor precipitação.

Tabela 5 - Biomassa final (simulada e observada), rendimento de grão (simulado e observado) e porcentagem de desvio (%) da cultura do milho para quatro épocas de semeadura na região de Arapiraca-AL, 2008.

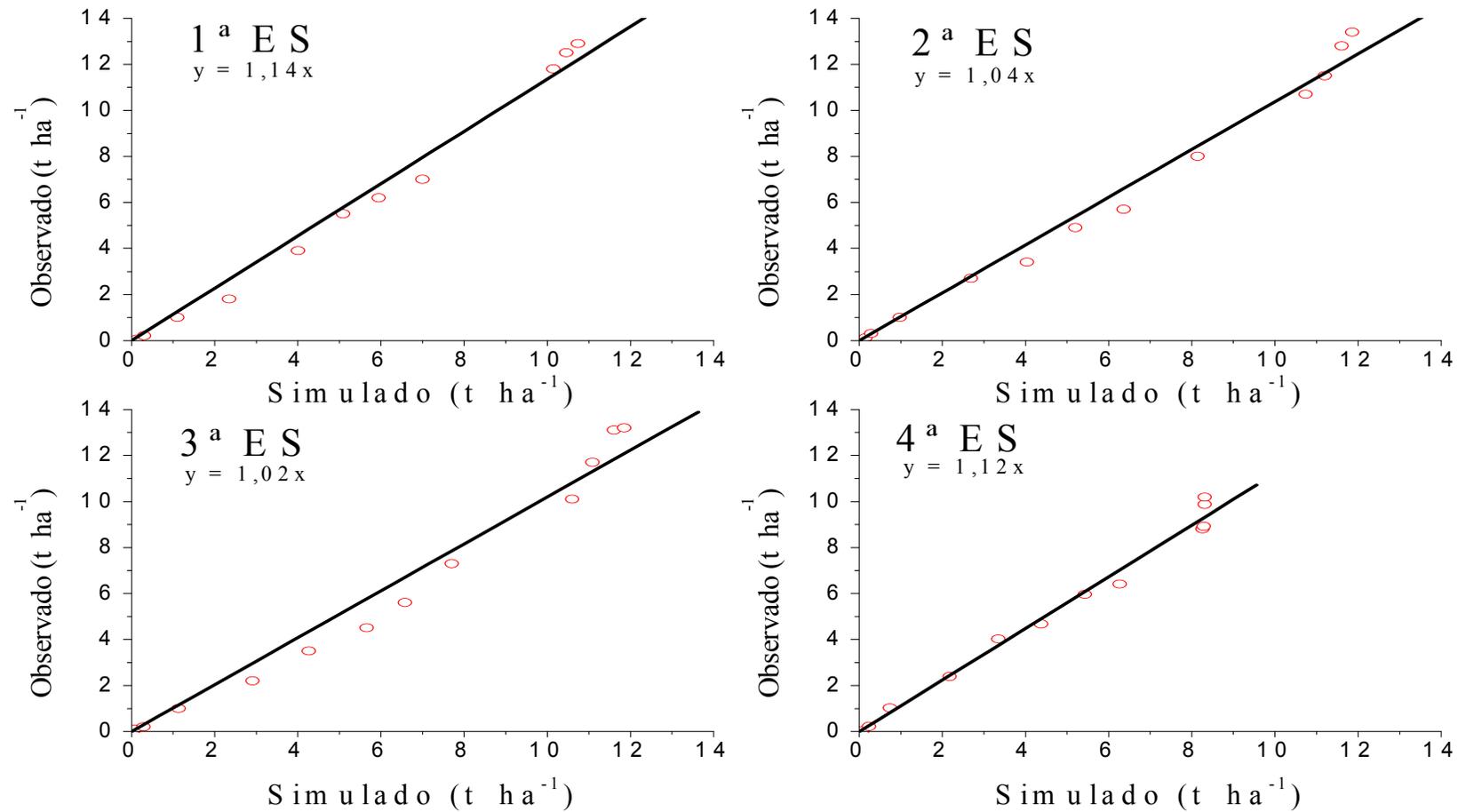
Época de semeadura	Biomassa Total			Rendimento de Grãos		
	Observada	Simulada	Desvio	Observado	Simulado	Desvio
	kg ha ⁻¹		%	kg ha ⁻¹		%
1 ^a	12.531	10.744	-14,3	3.780	3.760	-0,5
2 ^a	12.768	11.864	-7,1	4.119	4.034	-2,1
3 ^a	13.059	11.861	-9,2	4.497	4.406	-2,0
4 ^a	9.873	8.306	-15,9	1.968	2.069	5,1

Fonte: (Autor, 2011)

A Figura 7 mostra graficamente a análise de regressão para biomassa acumulada simulada e observada, para quatro épocas de semeadura de milho, na região de Arapiraca, 2008. De acordo com a análise de regressão, o modelo AquaCrop superestimou os valores de biomassa acumulada simulada para as quatro épocas de semeadura.

As maiores superestimativas de biomassa acumulada pelo modelo ficou compreendida entre a 1^a e 4^a época de semeadura com 14% e 12%, respectivamente. Todavia, a biomassa observada em função da simulada para a 2^a e 3^a época de semeio foram superestimadas em 4% e 2%, respectivamente.

Figura 7 - Análise de regressão para biomassa acumulada simulada e observada, para quatro épocas de semeadura de milho na região de Arapiraca-AL, 2008.



Fonte: (Autor, 2011)

A Tabela 6 mostra as épocas de semeadura (1ª a 4ª), raiz quadrada do erro médio (RMSE), coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmont (d), índice de confiança (c) e desempenho do modelo AquaCrop para produção de biomassa da cultura do milho na região de Arapiraca-AL, 2008.

A concordância entre os valores simulados e observados da biomassa ao longo do ciclo da cultura para as quatro épocas de semeio foi elevada, com índice de concordância de Willmont (d) entre 0,96 (3ª ES) e 0,98 (1ª ES). Os baixos valores da RMSE para biomassa simulada demonstra boa performance do AquaCrop. Os coeficientes de correlação (r) para todas as épocas de semeadura ficaram acima de 0,98 (3ª ES), o que resultou em excelente associação entre as variáveis observadas e simuladas. O desempenho do modelo foi classificado como “ótimo” (CAMARGO & SENTELHAS, 1997), pois apresentou valores compreendidos entre 0,94 (3ª ES) a 0,97 (1ª ES).

Tabela 6 - Épocas de semeadura (1ª a 4ª), raiz quadrada do erro médio (RMSE), coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmont (d), índice de confiança (c) e desempenho do modelo AquaCrop para produção de biomassa da cultura do milho na região de Arapiraca-AL, 2008.

Época de semeadura	Biomassa				
	RMSE t ha ⁻¹	r	d	c	desempenho
1ª	1,01	0,99	0,98	0,97	Ótimo
2ª	1,39	0,99	0,97	0,96	Ótimo
3ª	1,65	0,98	0,96	0,94	Ótimo
4ª	1,09	0,99	0,97	0,96	Ótimo

Fonte: (Autor, 2011)

4.3 Previsões de safra

Pela sua importância econômica, a previsão de produtividade é de grande valia, pois constitui informação extremamente útil para permitir ao agricultor e ao País melhor planejamento nas atividades do agronegócio (CARVALHO et al., 2005). O AquaCrop pode prever de maneira satisfatória a produção de biomassa e grãos para culturas forrageiras, produtoras de grãos, hortaliças de folhas, frutas, raízes e tubérculos. A informação disponibilizada pelo modelo sobre os dias antes da colheita (DAC), oferece ao usuário final intervalo de tempo suficiente para o planejamento das atividades de pré e pós colheita.

As épocas de semeadura e previsão (dias) da biomassa total e produtividade de grãos, para cultura do milho na região de Arapiraca-AL, 2008, são apresentadas na Tabela 7.

Para a 2ª e 4ª época de semeadura, o AquaCrop fez previsão da safra de grãos e biomassa total com 18 e 20 dias, respectivamente. A 3ª época de semeio apresentou período menor de previsão de produtividade de grãos (15 dias) e biomassa total (17 dias), para cultura do milho na região de Arapiraca.

Tabela 7 - Época de semeadura e previsão (dias) da biomassa total e produtividade de grãos, para cultura do milho na região de Arapiraca-AL, 2008.

Época de Semeadura	Previsão (dias)	
	Biomassa total	Grãos
1ª	18	16
2ª	20	18
3ª	17	15
4ª	20	18

Fonte: (Autor, 2011)

5 CONCLUSÕES

O modelo superestimou o armazenamento de água diário no solo a partir dos 70 dias após a emergência, para as três primeiras épocas de semeadura. Para a quarta época de semeadura a superestimativa inicia aos 33 dias após a emergência e prolonga-se até o final do ciclo da cultura.

O armazenamento total de água no solo pela porcentagem de desvio (TOJO SOLER, 2004), apresentou-se subestimado pelo modelo para a 1ª e 2ª época de semeadura, porém, a 3ª e 4ª época de semeadura os valores do armazenamento total foram superestimados.

A biomassa total foi subestimada pelo AquaCrop para as quatro épocas de semeadura. Para o rendimento de grãos a subestimativa corresponde às três primeiras épocas de semeadura, entretanto, a quarta época de semeadura ficou superestimada.

As diferenças entre as estimativas e os valores observados de biomassa total e produtividade de grãos para as condições edafoclimáticas do período de cultivo do milho na região de Arapiraca, AL, é, em termos práticos, aceitáveis, o que indica a aplicabilidade do modelo AquaCrop;

O modelo AquaCrop é uma ferramenta para previsão da produtividade de milho da variedade AL Bandeirante. Esse procedimento permite obter adequada estimativa do rendimento de grãos com 18 dias de antecedência à colheita na região do Agreste Alagoano, disponibilizando aos usuários finais do modelo programar o armazenamento, logística e comercialização da safra de grãos a ser colhida.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M.A.; SOUZA, J.L.M.; TSUKAHARA, R.Y. Modelo Agrometeorológico na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, n.1, p. 23-31. 2011.
- ARNHOLD, E.; PACHECO, C.A.P.; H.W.L.; SILVA, R.G.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.A. Produtividade de híbridos de milho em região de fronteira agrícola no nordeste do Maranhão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 4, p. 468-473. 2010.
- ALMEIDA, L.P.; ALVARENGA, A.A.; CASTRO, E.M.; ZANELA, S.M.; VIEIRA, C.V. Crescimento inicial de plantas de *Cryptocaria aschersoniana* Mez. submetidas a níveis de radiação solar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34. n. 1, p. 83-88. 2004.
- ANDRIOLO, J.L. **Fisiologia das culturas protegidas**. Santa Maria: ed. da UFSM. 1999. 142p.
- ANDRADE, F.H. Radiacion y temperatura determian los rendimientos máximos de maiz. **Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária**, Boletim Técnico, n. 106, 34p. 1992.
- ADDISCOTT, T.M.; WAGENET, R.J. Concepts of solute leaching in soils: A review of modeling approaches. **Journal Soil Science**, v. 36, p. 411–424. 1985.
- ACEVEDO, E.; HSIAO, T.C.; HENDERSON, D.W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status. **Plant Physiology**, v.48, p.631–636. 1971.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. Irrig. and Drainage Paper n°. 56. Rome, FAO. 1998. 300 p.
- BONNECARRERE, R.A.G.; DOURADO NETO, D.; MARTIN, T.N.; PEREIRA, A.R.; MANFRON, P.A. Estimativa das produtividades potencial e deplecionada no Estado do Rio Grande do Sul em função das condições climáticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n. 3, p. 280-288. 2007.
- BERGONCI, J. I.; PEREIRA, P.G. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 229-235. 2002.
- BARBANO, M.T.; DUARTE, A.P.; BRUNINI, O.; RECO, P.C.; PATERNIANI, A.G.Z.; KANTHACK, R.A.D. Temperatura-base e acúmulo térmico no subperíodo semeadura-florescimento masculino em cultivares de milho no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.2, p. 261-268. 2001.
- BINDI, M.; SINCLAIR, T.R.; HARRISON, J. Analysis of seed growth by linear increase in Harvest Index. **Crop Science**, v.39:486, p.493. 1999.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento do déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.) **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, p. 25-32. 1992.

BRADFORD, K.J.; HSIAO, T.C. Physiological responses to moderate water stress. In O.L. Lange et al. (ed.) *Physiological plant ecology. II. Water relations and carbon assimilation*. **Encyclopedia of Plant Physiology**, New Series. Vol. 12B. Springer-Verlag, New York, p. 263–324. 1982.

BROUWER, R.; DE WIT, C.T. A simulation model of plant growth with special attention to root growth and its consequences. In W.J. Whittington (ed.) *Root growth*. Proc. 15th Easter **School in Agriculture Science**. Butterworths, London, p. 224–244. 1969.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, décimo primeiro levantamento, agosto 2011**. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/index.htm>. Acesso em: 05/09/2011

CARVALHO, C.; VENCATO, A.Z.; KIST, B.B.; SANTOS, C.; REETZ, E.R.; POLL, H.; BELING, R.R. **Anuário Brasileiro do Milho 2011**. Santa Cruz do Sul, Ed. Gazeta Santa Cruz, 2011. 128 p.

CARVALHO, H.W.L.; CARDOSO, M.J.; LEAL, M.L.S.; SANTOS, M.X.; TABOSA, J.N.; SOUZA, E.M. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de milho no Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.5, p.471-477. 2005.

CARVALHO, L.G.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; ALVES, H.M.R. Aplicação da análise harmônica por séries de Fourier para a previsão de produtividade da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.732-741. 2005.

CARVALHO, H.W.L.; LEAL, M. L. S.; CARDOSO, M.J.; SANTOS, M.X.; TABOSA, J.N.; SANTOS, M.D.; LIRA, M.A. Adaptabilidade e estabilidade de híbridos de milho em diferentes condições ambientais do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.1, n.2, p.75-82. 2002.

COSTA, L.C.; BARROS, A.H.C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.1, p. 75-82. 2001.

CAVERO, J.; FARRE, I.; DEBAEKE, P.; FACI, J.M. Simulation of mayze yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. **Agronomy Journal**, v.92, p. 679–690. 2000.

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**, Santa Maria, v.5, n.1, p. 89-97. 1997.

CRUZ, J.C. *et al.*, **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – 2 ed. Brasília: EMBRAPA- SPI,1996. 204p.

CHAVES, M.M. Effects of water deficits on carbon assimilation. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 42, n. 234, p. 1-16, 1991.

COSTA, L.C. **Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba**. 40p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Viçosa-UFV/MG. 1988.

DELGADO, A.R.S.; DUARTE, W.S.; LIMA, V.N.; CARVALHO, D.F. Modelagem matemática para otimização da produção e renda de melão e melancia em função de lâminas de água e doses de nitrogênio. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 1-9. 2010.

DELMAR, S. A.; WINKLER, E. I.; PORTO, M. P.; BRANCÃO, N.; *et al.* **Ensaio regional de avaliação de variedades de milho**. Cruz Alta, RS. 2004, 5p

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA MILHO E SORGO, **Sistema de Produção**, 1 ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 6ª edição Set./2010. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/index.htm>. Acesso em: 27/06 /2011.

EHLERS, E. M. **O que se entende por agricultura sustentável?** São Paulo, 1993, 51p.

ENGEL, V.L.; POGGIANI, F. Estudo da concentração de clorofila nas folhas e seu espectro de absorção de luz em função do sombreamento em mudas de quatro espécies florestais nativas. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 3, n. 1, p. 39-45, jun. 1991.

FERREIRA JUNIOR, R.A. **Crescimento de variedades RB de cana-de-açúcar irrigadas e fotossíntese modelada pela radiação solar**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Alagoas, UFAL. 2010.

FARAHANI, H.J.; IZZI, G.; OWEIS, T.Y. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. **Agronomy Journal**, v.101, ed. 3, p. 469–476. 2009.

FERERES, E.; SORIANO, M.A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal Exp. Botanic**, v.58, p.145–159. 2007.

FERREIRA, W.P.M.; COSTA, L.C.; SOUZA, C.F. Modelo de estimativa de produtividade da soja {Glicine max (L) Merrill} em função da variabilidade da temperatura. **Engenharia na Agricultura**, v. 15. n.4. p. 400-407. 2007.

FREITAS, P.S.L.; MANTOVANI, F.C.; SEDYAMA, G.C.; COSTA, L.C. Penalização da produtividade da cultura do milho imposta pelo modelo Ceres-maize. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.27, n.1, p. 97-106. 2005.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SOUZA, J.L.M.; ZOCOLER, J.L. Funções de produção água-cultura. In: FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SOUZA, J.L.M.; ZOCOLER, J.L. (Ed.): **Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimentos**. Brasília: EMBRAPA, p.283-314. 2005.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 4ª ed., Livroceres Piracicaba, 2004, 360 p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Tecnologia da produção de milho**. FEALQ/ Departamento de produção Vegetal: ESALQ/ USP, 1999a

FLECK, N.G. et al. Característica de plantas de cultivares de arroz irrigado relacionados à habilidade competitivas com plantas concorrentes. **Planta Daninha**, v. 21, p. 97-104. 2003.

FONTANA, J.; BERLATO, M.A.; LAUSCHNER, M.A.; MELLO, R.W. Modelo de estimativa de rendimento no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.3, p. 399-403. 2001.

FERRIS, R.; WHEELER, T.R.; ELLIS, R.H.; HADLEY, P. Seed yield after environmental stress in soybean grown under elevated CO₂. **Crop Science**, v.39, p.710–718. 1999.

FRANCE, C.; THORNLEY, J.H.M. **Matematic models in agriculture. The quantitative approach to problems in agriculture and related sciences**. London: Butterworth, 1984.

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

FAOSTAT. **Séries temporais e dados transversais relativas à alimentação e à agricultura para cerca de 200 países**. Disponível em: < <http://faostat.fao.org/default.aspx> > Acesso em: 05/ 09/ 2011.

GALON, L.; TIRONI, S.P.; ROCHA, A.A.; SOARES, E.R.; CONCENÇO, G.; ALBERTO, C.M. Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 4, n. 3, p. 28. 2010.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J.A.; TABOADA, C.; MENDOZA, J.; HUANCA, R.; MAMANI, A.; CONDORI, O.; MAMANI, J.; MORALES, B.; OSCO, V.; STEDUTO, P. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) with FAO-AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, ed. 3, p. 499-508. 2009.

GUIMARÃES, M.A.; SILVA, D.J.H.; COSTA, L.C.; VIDIGAL, D.S.; SAMPAIO JÚNIOR, J.D.; ANDRADE, G.J.M. Modelo computacional para simular o crescimento e a produtividade potencial da cultura do tomateiro. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.14, n.3, p. 353-363. 2006.

HSIAO, T.C.; HENG, L.K.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES D.; FERERES E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v.101, ed. 3, p. 448–459. 2009.

HENG, L.K.; HSIAO, T.C.; EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. **Agronomy Journal**, v.101, ed.3, p.488-498. 2009.

HSIAO, T.C.; XU, L.K. Sensitivity of growth of roots vs. leaves to water stress: Biophysical analysis and relation to water transport. **Journal Exp. Botanic**, v.51, p.1595–1616. 2000.

HSIAO, T.C. Effects of drought and elevated CO₂ on plant water use efficiency and productivity. In M.D. Jackson and C.R. Black (ed.) **Global environmental change. Interacting stresses on plants in a changing climate**. NATO ASI Series. Springer-Verlag, New York, p. 435–465. 1993b.

HANKS, R.J. Yield and water-use relationships. In H.M. Taylor, W.R. Jordan, and T.R. Sinclair (ed.) **Limitations to efficient water use in crop production**. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, p. 393–411. 1983.

HSIAO, T.C. The soil-plant-atmosphere continuum in relation to drought and crop production. In Drought resistance in crops, with emphasis on rice. **IRRI**, Los Baños, Philippines, p.39–52. 1982.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE Cidades @ Alagoas**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?uf=al>>. Acesso em: 09/11/2011.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal Agronomy**, v. 18, p. 235–265. 2003.

JAME, Y.W.; CUTFORTH, W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v.76, p. 9-19. 1996.

JONES, H.G. **Plant and Microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2.ed. Cambridge: University Press, Cambridge, 1992. 428 p.

JONES, J.W.; KINIRY, J.R. **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development**. Texas A&M Univ. Press, College Station. 1986.

KRUGER, C.A.M.B.; FONTANA, D.C.; MELO, R.W. Estimativa de rendimento de grãos da soja no Rio Grande do Sul usando modelo agrometeorológico espectral regionalizado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** v.15, n.3. p. 210-219. 2007.

KEMANIAN, A.R.; STOCKLE, C.O.; HUGGINS, D.R.; VIEGA, L.M. A simple method to estimate harvest index in grain crops. **Field Crops Res**, v.103, p.208–216. 2007.

KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; GASSMAN, P.W.; DEBAEKE, P. **A general, process-oriented model for two competing plant species**. Trans. ASAE 35, p. 801–810. 1992.

LEITE, A.M.A. **O município de Arapiraca/AL e sua dinâmica histórica de ocupação e renda**. Universidade Estadual de Alagoas/ UNEAL. Disponível em: <<http://www.egal2009.easyplanners.info/.../60171>>. Acesso em: 11/11/2011.

LYRA, G.B.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; LYRA, G.B.; MOURA FILHO, G.; ARAÚJO JUNIOR, R.F. Conteúdo de água no solo em cultivo de milho sem e com cobertura morta na entrelinha na região de Arapiraca-AL. **Irriga**, Botucatu, v. 15. n. 2, p. 173-183. 2010.

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

MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**, p. 238-257. 2009.

MARCHÃO, R.L. et al. Interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e rendimento de grãos de milho adensado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, p. 170-181. 2006.

MARQUES, P.A.A.; FRIZZONE, J.P. Modelo computacional para determinação do risco econômico em culturas irrigadas. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.27, n.4, p. 719-727. 2005.

MANFRON, P.A.; BACCHI, O.O.S.; DOURADO NETO, D.; PEREIRA, A.R.; MEDEIROS, S.L.P.; PILAU, F.G. Modelo da profundidade efetiva do sistema radicular na cultura de milho em função de graus-dia acumulados. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 327-332. 2003.

MATZENAUER, R. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 1, p. 35-43. 2002.

MCMASTER, G.S.; WILHELM, W.W. Growing degree-days: One equation, two interpretations. **Agriculture Forest Meteorology**, v. 87, p. 291–300. 1997.

MONTEITH, J.L.; ELSTON, J. Climatic constraints on crop production, In: Fowden, L., Mansfield, T., Stoddart, J. (eds.) **Plant adaptation to environmental stress**. London: Chapman & Hall, p. 3-18. 1996.

MONTEITH, J.L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 695–697. 1996.

MOOT, D.J.; JAMIENSON, P.D.; HENDERSON, A.L.; FORD, M.A.; PORTER, J.R. Rate of change in harvest index during grain-illing of wheat. **Journal Agriculture Science**, v. 126, p. 387–395. 1996.

MALUF, J.; MATZENAUER, R. **Zoneamento Agroclimático da cultura do milho por épocas de semeadura no estado do rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, (Boletim, 1), 75p. 1995.

MATZENAUER, R. et al. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, n. 1, p. 85-92. 1995.

MUKHTAR, et al. Corn growth as effected by excessive soil water. **Trasactions of the ASAE**, v. 33, p. 135-155, 1990.

PASSIOURA, J.B. Simulation models: Science, snake oil, or engineering? **Agronomy Journal**, v. 88, p. 690–694. 1996.

RAES, D.; STEDUTO P.; HSIAO T.C.; FERERES E. **Reference Manual. AquaCrop, version 3.1 plus**. Chapter 1. FAO Cropwater productivity model to simulate yield response to

water. Janeiro-2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/wateraquacrop.html>>. Acesso em: 02/08/2011.

RAES, D.; STEDUTO P.; HSIAO T.C.; FERERES E. **Reference Manual. AquaCrop, version 3.1 plus**. Chapter 3. Calculation Procedures. Janeiro-2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/wateraquacrop.html>>. Acesso em: 02/08/2011.

RAES, D.; STEDUTO P.; HSIAO T.C.; FERERES E. **Reference Manual. AquaCrop, version 3.0**. Chapter 1. AquaCrop – The FAO Crop model to simulate yield response to water. Janeiro-2009. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/wateraquacrop.html>>. Acesso em: 03/05/2010.

RAES, D.; STEDUTO P.; HSIAO T.C.; FERERES E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, ed. 3, p.438–447. 2009.

RODRIGUES, W.C. **Apostila Estatística Aplicada**. 6ª Ed. Revisada e Ampliada, 2008. Disponível em: <<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/br>> Acesso em: 17/11/2011.

RAY, J.D.; SINCLAIR, T.R. Stomatal closure of maize hybrids in response to drying soil. **Crop Science**, Madison, v. 37, p. 803-807, 1997.

ROSA, L.M.; DILLENBURG, L.R.; FORSETH, I.N. Responses of soybean leaf angle, photosynthesis and stomatal conductance to leaf and soil potential. **Annals of Botany**, London, v. 67, p. 51-58, 1991.

RAES, D.; LEMMENS, H.; VAN AELST, P.; VANDEN BULCKE, M.; SMITH, M. **IRISIS–Irrigation scheduling information system**. Volume 1. Manual., Reference Manual 3. Dep. Land Management, K.U. Leuven Univ., Leuven, Belgium. 1988.

RAES, D. **A summary simulation model of the water budget of a cropped soil**. (Dissertationes de Agricultura no. 122). K.U. Leuven Univ., Leuven, Belgium. 1982.

SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA E DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO DE ALAGOAS - SEAGRI, **Produtores Debatem Programa de Produção de milho para o Estado de Alagoas**. Disponível em: <<http://www.agricultura.al.gov.br/noticias/produtores-debatem-programa-de-produção-de-milho>>. Acesso em: 27/06 /2011.

SOUZA, J.L.; SILVA, E.C.; LYRA, G.B.; LYRA, G.B.; TEODORO, I.; FERREIRA JUNIOR, R.A.; BRITO, J.E.D.; SILVA, M.B.P. **Condições Agrometeorológicas em cultivo de milho na região de Arapiraca, AL**. Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém-PA, 2010. Disponível em: <www.cbmet2010.com/anais/artigos/208_57281.pdf>.

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

STRIEDER, M.L. et al. Características de dose e rendimento de milho em diferentes espaçamentos e sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 309-317. 2008.

STEDUTO, P.; ALBRIZIO, R. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. II. Water Use Efficiency and comparison with Radiation Use Efficiency. **Agriculture Forest Meteorology**, v.130, p.269–281. 2005.

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

STEDUTO, P.; ALBRIZIO, R.; GIORIO, P.; SORRENTINO, G. Gas-exchange and stomatal and non-stomatal limitations to carbon assimilation of sunflower under salinity. **Environment Experimental Botanic**, v.44:243, p.255. 2000.

SHALHEVET, J. Plants under salt and stress. In: FOWDEN, L.; MANSFIELD, T.; STODDART, J. **Plant adaptation to environmental stress**. London: Chapman & Hall, Cap. 7, p. 133-154. 1993.

SMITH, M. **CROPWAT—A computer program for irrigation planning and management**. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 46. FAO, Rome. 1992.

SOIL CONSERVATION SERVICE. Soil–Plant–Water Relationships. Irrigation. In National Engineering Handbook, **Soil Conservation Service, USDA**, Washington, DC Section 15 Chapter 1, p. 1-56. 1991.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J.; ROMBERGER, J.S.; PAPENDICK, R.I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.50, p.1031–1036. 1986.

TAIZ, L.; ZIEGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Trad.: SANTARÉM, E. R. et al., 3º ed., Porto Alegre: Artemed, 2004. 719p.

TOJO-SOLER, C.M. **Uso do modelo Ceres-Maize para previsão de safra do milho “safrinha”**. 132p. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros, ESALQ/USP. 2004.

TOJO-SOLER, C.M.; FOLEGATTI, M.V.; FARIA, R.T. Uso do modelo CERES-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho “safrinha”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.2. p. 339-346. 2001.

TANNER, C.B.; SINCLAIR, T.R. Efficient water use in crop production: Research or re-research?. In H.M. Taylor, W.R. Jordan, and T.R. Sinclair (ed.) **Limitations to efficient water use in crop production**. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, p. 1–27. 1983.

VILELA, A.E.; RAVETTA, D.A. The effect of radiation on seedling growth and physiology in four species of *Propolis* L. (Mimosaceae). **Journal of Arid Environmental**, v. 44, p. 415-423. 2000.

VARTAPETIAN, B.B.; JACKSON, M.B. Plant adaptations to anaerobic stress. **Annals of Botany**, v. 79, p. 3-20. 1997.

WILLIAMS, J.R.; JONES, C.A.; DYKE, P.T. **EPIC - Erosion/ productivity impact calculator. 1. The EPIC model**. USDA-ARS, Temple, TX. 1989.

WHISLER, F.D. et al. Crop simulation models in agronomic systems. **Advances in Agronomy**, New York, v. 40, p. 141-208. 1986.

WIT, C.T. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H (ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen, Pudoc, p. 3-8. 1982.

WIT, C.T. Transpiration and crop yields. **Agric. Res. Rep. 64(6)**. Wageningen, Pudoc. The Netherlands. 1958.

ANEXOS

ANEXO A – Sub-rotinas para o cálculo do WP_{ajus}^* e IC (RAES et al., 2009, 2011)

O ajuste total da padronização da produtividade hídrica das culturas para CO_2 atmosférico, produtos sintetizados e fertilidade do solo é dada por:

$$m_i = K_{S_b} WP_{adj}^* \left(\frac{Tr_i}{ETO_i} \right) \quad (1)$$

em que, m_i é a produção de biomassa aérea por dia ($g\ m^{-2}$ ou $t\ ha^{-1}$); Tr_i é a transpiração diária da cultura ($mm\ d^{-1}$); Eto_i é a evapotranspiração de referência diária ($mm\ d^{-1}$); WP_{adj}^* é a produtividade de biomassa ajustada em relação ao uso da água ($g\ m^{-2}$ ou $t\ ha^{-1}$) para concentração atmosférica de CO_2 , tipos de produtos sintetizados durante a formação de rendimento e fertilidade do solo e K_{S_b} é o fator de ajuste para graus-dia.

$$GD = T_M - T_{base} \quad (2)$$

em que, a T_{base} é a temperatura base da cultura ($10\ ^\circ C$). Para o cálculo da temperatura base o AquaCrop também utiliza uma temperatura superior ($30\ ^\circ C$). A T_M é a temperatura média é dada por:

$$T_M = \frac{(T_x^* + T_n^*)}{2} \quad (3)$$

em que, T_M é a temperatura média ($^\circ C$); T_x^* é a temperatura máxima ($^\circ C$) e T_n^* é a temperatura mínima do ar ($^\circ C$) ajustadas. Para os ajustes das temperaturas máximas e mínimas do ar as seguintes regras se aplicam:

- T_x^* é a temperatura máxima do ar ($T_x^* = T_x$)

Se T_x é maior que $T_{superior}$, então $T_x^* = T_{superior}$,

Se T_x é menor que T_{base} , então $T_x^* = T_{base}$

- T_n^* é a temperatura mínima do ar ($T_n^* = T_n$)

Se T_n é maior que $T_{superior}$, então $T_n^* = T_{superior}$,

Se T_n é menor que T_{base} , então $T_n^* = T_{base}$

$$WP_{adj}^* = f_{CO_2} f_{rend} K_{S_{WP}} WP^* \quad (4)$$

em que; f_{CO_2} é o coeficiente de correção para CO₂; f_{rend} é o coeficiente de correção para rendimento; $K_{S_{WP}}$ é o coeficiente de estresse hídrico para produtividade de água padronizada e WP^* é a produtividade de biomassa padronizada em relação ao uso da água (g m⁻² ou t ha⁻¹).

$$WP_{adj}^* = f_{CO_2} WP^* \quad (5)$$

$$f_{CO_2} = \frac{(C_{a,i} / C_{a,o})}{1 + 0,000138(C_{a,i} - C_{a,o})} \quad (6)$$

em que, WP_{adj}^* é a produtividade ajustada de biomassa em relação ao uso da água (kg ha⁻¹); WP^* é a produtividade de água padronizada (g m⁻²); f_{CO_2} é o coeficiente de correção para CO₂; $C_{a,o}$ é a concentração de referência de CO₂ atmosférico (369,41 ppm = 716,0 mg m⁻³) e $C_{a,i}$ é a concentração atmosférica de CO₂ para o ano i (ppm ou mg m⁻³).

$$WP_{adj}^* = f_{rend} WP^* \quad (7)$$

em que, WP_{adj}^* é a produtividade de biomassa ajustada em relação ao uso da água (kg ha⁻¹) para formação de rendimento e f_{rend} é o coeficiente de correção para produtos sintetizados ($f_{rend} \leq 1$).

$$WP_{adj}^* = K_{S_{WP,x}} WP^* \quad (8)$$

em que, WP_{adj}^* é a produtividade de biomassa ajustada em relação ao uso da água (kg ha⁻¹) para fertilidade do solo; $K_{S_{WP,x}}$ é o coeficiente de estresse da fertilidade do solo para produtividade hídrica ($K_{S_{WP}} \leq 1$).

$$Ks_{WP,i} = 1 - f_{WP,x} \left(\frac{\sum_{j=1}^i (Ks_{b,j} (Tr_j / ETo_j))}{\sum_{j=1}^n (Ks_{b,j} (Tr_{x,j} / ETo_j))} \right)^2 \quad (9)$$

em que, $Ks_{WP,i}$ é o coeficiente de estresse da fertilidade do solo para produtividade de biomassa em relação ao uso da água no dia i ; $f_{WP,x}$ é a redução máxima para WP para um dado nível de fertilidade do solo, que pode ser observada no final da estação quando a cultura não sofre estresse hídrico ($f_{WP} = 1 - Ks_{WP,x}$); $\Sigma (Tr_j / ETo_j)$ é a soma de água transpirada no dia i ; $\Sigma (Tr_{x,j} / ETo_j)$ é a soma de água que terá sido transpirada no final da estação para determinado nível de fertilidade do solo quando a cultura não sofre estresse hídrico; Ks é o coeficiente de estresse de temperatura para produção de biomassa e n é o número de dias da estação

O cálculo do índice de colheita (IC) para condições não-estressantes é dado por:

$$IC_i = \frac{IC_{ini} IC_0}{IC_{ini} + (IC_0 - IC_{ini}) \exp^{-(ICGC)t}} \quad (10)$$

em que, IC_i é o índice de colheita no dia i após a floração; IC_0 é o índice de colheita de referência ($Y B^{-1}$); IC_{ini} é o índice de colheita inicial (IC_{ini} é 0,01); $ICGC$ é o coeficiente de crescimento para IC (d^{-1}) e t é o tempo após o florescimento, (d^{-1}). A correção total para o IC no final da formação do rendimento é dado por:

$$IC = f_{ante} f_{post} IC_{ajus} \quad (11)$$

em que, IC é o índice de colheita alcançado no final da formação de rendimento (%); f_{ante} é o fator pelo qual o IC_{ajus} tem que ser multiplicado para considerar o efeito do estresse hídrico antes da floração; f_{post} é o fator pelo qual IC_{ajus} tem que ser multiplicado para considerar o efeito do estresse hídrico após a floração e o IC_{ajus} é o índice de colheita ajustado para falha da polinização e fotossíntese inadequada.

Para B_{rel} entre o limite inferior e superior:

$$f_{ante} = 1 + \frac{1 + \sin\left[\left(1,5 - taxa_{inferior}\right)\pi\right]}{2} \frac{\Delta IC_{ante}}{100} \quad (12)$$

em que, B_{rel} é a biomassa relativa no início da floração; $B_{r,baixo}$ é o limite inferior do intervalo da B_{rel} afetando IC_0 ; $B_{r,top}$ é o intervalo da parte superior da B_{rel} afetando IC_0 e f_{ante} é o coeficiente pelo qual IC_0 tem que ser multiplicado para se considerar o efeito do estresse hídrico antes da floração;

$$0 \leq taxa_{inferior} = \frac{B_{rel} - B_{r,baixo}}{B_{r,top} - B_{r,baixo}} \leq 1 \quad (13)$$

$$B_{rel} = \frac{B}{B_o} \quad (14)$$

em que, B_{rel} é a biomassa relativa determinada no início do florescimento ($kg\ ha^{-1}$); B é a biomassa real ($kg\ ha^{-1}$) e B_o é a biomassa potencial ($kg\ ha^{-1}$);

Para B_{rel} entre o topo e o limite superior ($B_{rel} = 1$):

$$f_{ante} = 1 + \frac{1 + \sin\left[\left(0,5 - taxa_{superior}\right)\pi\right]}{2} \frac{\Delta IC_{ante}}{100} \quad (15)$$

em que, $B_{r,top}$ é o intervalo da parte superior da B_{rel} afetando o IC_0 ; $B_{r,up}$ é o intervalo superior da B_{rel} afetando o IC_0 e f_{ante} é o coeficiente pelo qual IC_0 tem que ser multiplicado para se considerar o efeito do estresse hídrico antes da floração;

$$0 \leq taxa_{superior} = \frac{B_{rel} - B_{r,alto}}{B_{r,superior} - B_{r,alto}} \leq 1 \quad (16)$$

$$f_{post} = \left(\frac{w_1 f_{post\uparrow} + (w_2 - w_1)}{w_2} \right) f_{post\downarrow} \quad (17)$$

em que, w_1 é a duração do período quando o crescimento vegetativo ainda é possível (d^{-1}); w_2 é a duração do período da formação de rendimento (d^{-1}) e f_{post} é o coeficiente pelo qual IC_0 tem que ser multiplicado para considerar o efeito combinado do estresse hídrico após a floração.

$$IC_{ajus} = \sum_1^j \left(KS_j \left(1 + \frac{f_{\text{excesso}}}{100} \right) F_j IC_o \right) \leq IC_o \quad (18)$$

em que, j é o número de dias desde o início do florescimento ($j = 1$ no início da floração); f_{excess} - excesso de pólen (%); F_j é o florescimento fracionado no dia j ; KS_j é o fator de estresse limitando a polinização no dia j e IC_o .

ANEXO B - Sub-rotina para cálculo do balanço hídrico (RAES et al., 2009, 2011)

Para descrever com precisão o movimento de captação, retenção e perda de água no perfil do solo ao longo do ciclo vegetativo, o AquaCrop usa as seguintes equações:

$$Wr = 1000 \theta Z \quad (19)$$

em que, Wr é o conteúdo de água no solo na zona das raízes (mm); 1000θ é o conteúdo médio de água no solo para zona de raiz, ($mm \ m^{-1}$); θ é a média volumétrica do conteúdo de água na zona radicular ($m^3 \ m^{-3}$) e Z é a profundidade efetiva das raízes (m).

$$Z = Z_o + (Z_x - Z_o) \sqrt{\frac{\left(t - \frac{t_o}{2} \right)}{\left(t_x - \frac{t_o}{2} \right)}} \quad (20)$$

em que, Z é a profundidade efetiva das raízes no tempo t (m); Z_o é a profundidade inicial de semeadura (m); Z_x é a máxima profundidade efetiva de enraizamento (m); t_o é o tempo inicial para atingir a emergência da cultura (d^{-1} ou $^{\circ}C \ d^{-1}$); t_x é o tempo máximo após o plantio quando Z_x é atingido (d^{-1} ou $^{\circ}C \ d^{-1}$); t é o tempo após o plantio (d^{-1} ou $^{\circ}C \ d^{-1}$) e n é o fator forma.

$$Dr = Wr_{CC} - Wr = 1000 (\theta_{CC} - \theta) Z \quad (21)$$

em que, Dr é o esgotamento da zona radicular (mm); Wr_{CC} é o conteúdo de água no solo na zona da raiz na capacidade de campo (mm); Wr é o conteúdo de água no solo da zona de raízes (mm); θ_{CC} é o conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$) e θ é o conteúdo volumétrico de água na zona radicular ($m^3 m^{-3}$);

$$CAD = 1000 (\theta_{CC} - \theta_{PM}) Z = Wr_{CC} - Wr_{PMP} \quad (22)$$

em que, CAD é o total de água disponível no solo na zona radicular (mm); θ_{PMP} é o conteúdo volumétrico de água no ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$); Z é a profundidade efetiva de enraizamento (m) e Wr_{PMP} é o conteúdo de água do solo na zona de raiz no ponto de murcha permanente (mm).

$$\frac{\Delta \theta_i}{\Delta t} = \tau (\theta_{SAT} - \theta_{CC}) \frac{e^{\theta_i - \theta_{CC}} - 1}{e^{\theta_{sat} - \theta_{CC}} - 1} \quad (23)$$

onde, $\Delta \theta_i / \Delta t$ é a diminuição da umidade do solo na profundidade i ($m^3 m^{-3} d^{-1}$); τ é a drenagem característica; θ_i é o conteúdo de água atual do solo na profundidade i ($m^3 m^{-3}$); θ_{SAT} é o conteúdo de água no solo na saturação ($m^3 m^{-3}$) e Δt é o espaço de tempo (d^{-1}).

Drenagem característica (τ)

$$0 \leq \tau = 0.0866 K_{sat}^{0.35} \leq 1 \quad (24)$$

em que, K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada ($mm d^{-1}$).

$$DP = 1000 \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \Delta z \Delta t \quad (25)$$

em que, θ é o conteúdo de água no solo da drenagem do perfil do solo ($m^3 m^{-3}$); $\Delta \theta / \Delta t$ é a diminuição da umidade do solo na profundidade i ($m^3 m^{-3} d^{-1}$); Δz é a espessura do perfil do solo (m) e Δt é o intervalo de tempo (d^{-1}).

$$RO = \frac{[P - (0,2) S]^2}{P + S - (0,2) S} \quad (26)$$

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (27)$$

em que, RO é a quantidade de água perdida por escoamento superficial (mm); P é a precipitação (mm); (0,2) S é a quantidade de água que pode infiltrar, antes de ocorrer o escoamento (mm); S é o máximo potencial de armazenamento (mm) e CN é a Curva Número.

Infiltração

A quantidade máxima que pode se infiltrar no solo, quer como chuva ou irrigação, é limitada pela condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) da camada superficial do solo. Depois de infiltrada no solo, a água é armazenada em compartimentos sucessivos a partir do topo para baixo, regido pelo limite imposto pela capacidade de drenagem ($\Delta\theta_i / \Delta t$) da diferença de compartimentos.

$$E_{ajus} = \left(\sqrt[n]{\frac{AFE}{20}} \right) E \quad (28)$$

em que, E_{ajus} é a evaporação do solo ajustada (mm d^{-1}); AFE é a água facilmente evaporável (mm); E é a evaporação do solo (mm d^{-1}) e n é um parâmetro do programa.

$$AFE = 1000 (\theta_{CC} + \theta_{ar\ seco}) Z_{e, \text{superf}} \quad (29)$$

em que, $\theta_{ar\ seco}$ é o conteúdo de água no ar seco ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e $Z_{e, \text{superf}}$ é a espessura da camada de evaporação da superfície do solo em contato direto com a atmosfera (m).

$$E = (Kr Ke) ET_o \quad (30)$$

em que, E é a evaporação do solo (mm d^{-1}); Kr é o coeficiente de redução da evaporação; Ke é o coeficiente de evaporação do solo e ET_o é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}).

$$0 \leq Kr = \frac{\exp^{f_k W_{rel}} - 1}{\exp^{f_k} - 1} \leq 1 \quad (31)$$

em que, f_k é um fator de declínio e W_{rel} é o conteúdo relativo de água da camada superficial do solo.

$$Ke = (1 - CD^*) Ke_x \quad (32)$$

em que, $1 - CD^*$ é a fração ajustada da superfície do solo não coberta pelo dossel e Ke_x é o coeficiente de evaporação máxima do solo.

Ajuste da fração da superfície do solo não coberto pelo dossel

$$(1 - CD^*) = 1 - 1,72 CD + CD^2 - 0,30 CD^3 \geq 0 \quad (33)$$

Evaporação no estágio da limitação de energia- Etapa I

$$E_{Etapa I} = (1 - CD^*) Ke_x ET_o \quad (34)$$

Evaporação no estágio da queda de taxa- Etapa II

$$E_{Etapa II} = Kr (1 - CD^*) Ke_x ET_o \quad (35)$$

Evapotranspiração da cultura

$$ET_c = (Kcb + Ke) ET_o \quad (36)$$

em que, Kcb é o coeficiente de transpiração da cultura.

Transpiração da cultura

$$Tr = (Ks Kcb) ET_o \quad (37)$$

em que, Tr é a transpiração da cultura (mm d^{-1}); Ks é o coeficiente de estresse hídrico do solo.

Relação entre cobertura do dossel (CD) e o índice de área foliar (IAF), (HENG et al., 2009)

$$CD = 1,005 [1 - \exp(-0,6 IAF)]^{1,2} \quad (38)$$

em que, CD é a cobertura do dossel ($m^2 m^{-2}$) e IAF é o índice de área foliar ($m^2 m^{-2}$).

$$Kcb = CD^* Kcb_x \quad (39)$$

em que, Kcb_x é o coeficiente de transpiração máxima da cultura (solo bem úmido e cobertura do dossel completo, $CD = 1$) e CD^* é a cobertura do dossel real ajustada para efeitos micro-advectivo ($m^2 m^{-2}$):

$$CD^* = 1,72 CD - CD^2 + 0,30 CD^3 \quad (40)$$

$$Kcb_{x,ajust} = Kcb_x - (t - 5) f_{idade} CD_x \quad (41)$$

em que, $Kcb_{x,ajust}$ é o coeficiente de transpiração máxima da cultura ajustado; t é o tempo (d^{-1}); f_{idade} é um fator de ajuste da idade da cultura e CD_x é a máxima cobertura do dossel ($m^2 m^{-2}$).

$$Kcb_{x,sen} = Kcb_{x,ajust} (f_{sen}) \quad (42)$$

com

$$f_{sen} = \left(\frac{CD}{CD_x} \right)^a \quad (43)$$

Em que, $Kcb_{x,sen}$ é o coeficiente de transpiração máxima da cultura quando a senescência é desencadeada; $Kcb_{x,ajust}$ é o coeficiente de transpiração máxima da cultura ajustado; f_{sen} é um fator de ajuste da senescência do dossel e a é um parâmetro do programa.

Coeficiente de estresse hídrico do solo para fechamento dos estômatos ($K_{s_{est}}$)

$$Tr = K_{est} Kcb ETo \quad (44)$$

em que, K_{est} é o coeficiente de estresse hídrico para fechamento estomático.

Coeficiente de estresse hídrico do solo para condições deficientes de aeração ($K_{S_{aer}}$)

$$Tr = K_{S_{aer}} Kcb ET_o \quad (45)$$

em que, $K_{S_{aer}}$ é o coeficiente de estresse hídrico para alagamento.

Extração de água do solo

$$S_i = K_{S_i} S_{x,i} \quad (46)$$

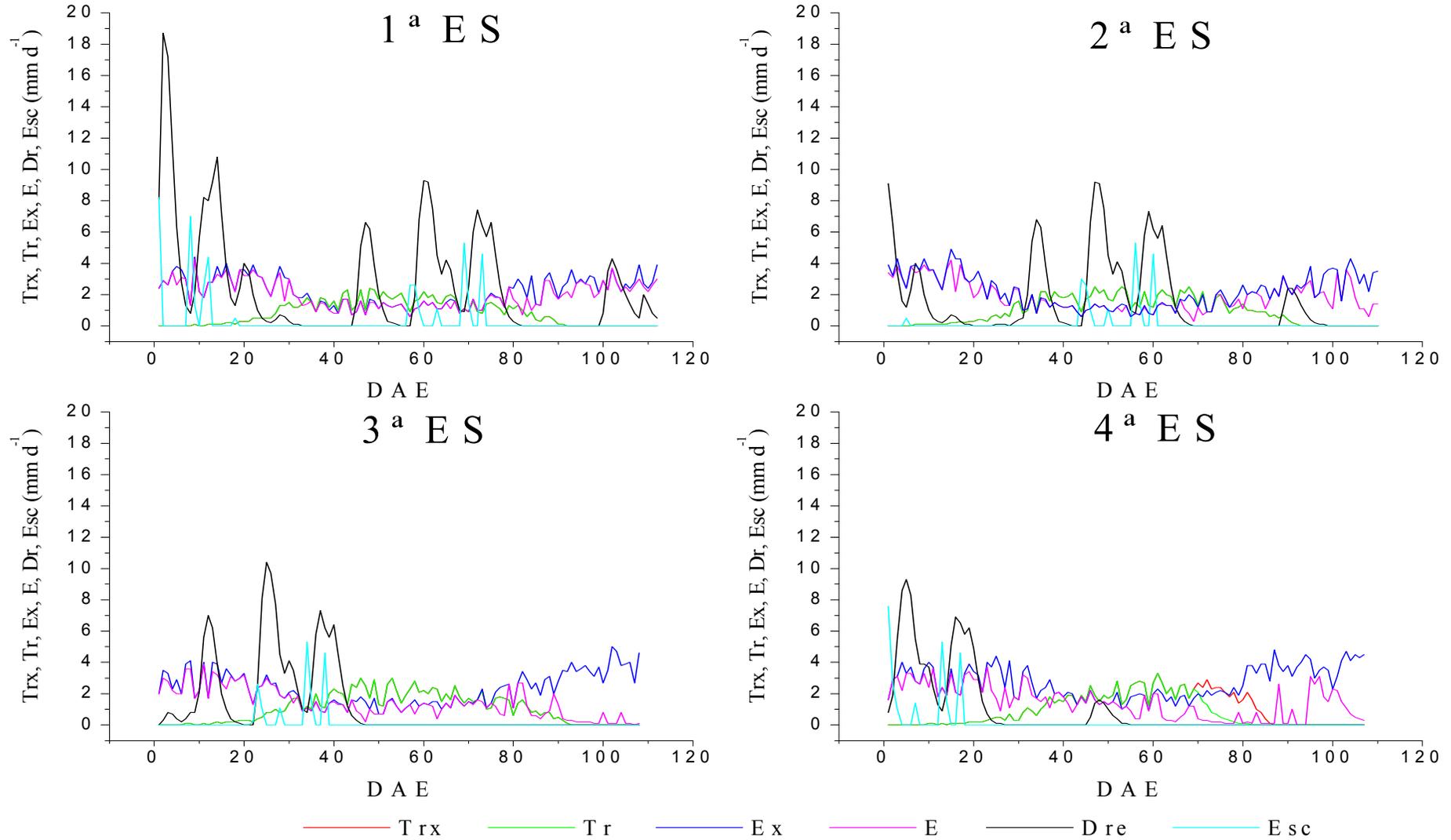
em que, S_i é a extração de água no solo na profundidade i ($m^3 m^{-3} d^{-1}$); K_{S_i} é o coeficiente de estresse hídrico para o conteúdo de água no solo na profundidade i e $S_{x,i}$ é a extração máxima de água no solo na profundidade i ($m^3 m^{-3} d^{-1}$).

Quantidade de água que pode ser extraída pela transpiração

$$Tr = \int_{sup}^{inf} 1000 (K_{S_i} S_{x,i}) dz_i \leq K_{S_{zona da raiz}} Kcb ET_o \quad (47)$$

em que, dz_i é a espessura do perfil do solo (m); $K_{S_{zona da raiz}}$ é o coeficiente de estresse hídrico na zona da raiz.

Figura 1 - Transpiração máxima (Trx), Transpiração real (Tr), Evaporação máxima (Ex), Evaporação real (E), Drenagem (Dr) e Escoamento Superficial (Esc), simulado pelo modelo AquaCrop para quatro épocas de semeadura (ES) de milho na região de Arapiraca-AL, 2008.



Fonte: (Autor, 2011)

ANEXO C - Sub-rotina para o cálculo da cobertura do dossel (CD) (RAES et al., 2009, 2011)

Desenvolvimento do dossel para crescimento exponencial ($CD \leq CD_x / 2$)

$$CD = CD_o e^{t CCD} \quad (48)$$

em que, CD é a cobertura do dossel ($m^2 m^{-2}$); CD_o é a cobertura inicial do dossel ($m^2 m^{-2}$); t tempo (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$) e CCD é o coeficiente de crescimento do dossel (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$).

Desenvolvimento do dossel para declínio exponencial ($CD > CD_x / 2$)

$$CD = CD_x - 0,25 \frac{(CD_x)^2}{CD_o} e^{-t CCD} \quad (49)$$

em que, CD é a cobertura do dossel ($m^2 m^{-2}$); CD_o é a cobertura inicial do dossel ($m^2 m^{-2}$); t é o tempo (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$) e CCD é o coeficiente de crescimento do dossel (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$).

Declínio da cobertura do dossel

$$CD = CD_x \left[1 - 0,05 \left(e^{\frac{CDD}{CD_x} t} - 1 \right) \right] \quad (50)$$

em que, CDD é o coeficiente de declínio do dossel (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$) e t é o tempo (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$)

Limite superior de água no solo para o crescimento e expansão foliar

$$Wr_{sup, exp} = (\theta_{CC} - p_{sup, exp} (\theta_{CC} - \theta_{PMP})) 1000 Z \quad (51)$$

ou o esgotamento da zona radicular (Dr) exceder:

$$Dr_{sup, exp} = p_{sup, exp} CAD \quad (52)$$

em que, $Wr_{sup, exp}$ é o limite superior expresso como profundidade equivalente (mm); $Dr_{sup, exp}$ é o limite superior expresso como esgotamento da zona de raiz (mm); Z é a profundidade efetiva (m).

Limite inferior de água no solo para o crescimento e expansão foliar

$$Wr_{inf, exp} = (\theta_{CC} - p_{inf, exp} (\theta_{CC} - \theta_{PMP})) 1000 Z \quad (53)$$

ou o esgotamento zona radicular (Dr) alcançar:

$$Dr_{inf, exp} = p_{inf, exp} CAD \quad (54)$$

em que, $Wr_{inf, exp}$ é o limite inferior expresso como profundidade equivalente (mm); $Dr_{inf, exp}$ é o limite inferior expresso como esgotamento da zona de raiz (mm); $p_{inf, exp}$ é a fração da CAD que pode ser esgotada da zona da raiz em que não há mais nenhuma folha em expansão ou crescimento.

$$CCD_{ajus} = Ks_{cres, exp} CCD \quad (55)$$

em que, CCD_{ajus} é o coeficiente de crescimento do dossel ajustado para crescimento e expansão foliar (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$); $Ks_{cres, exp}$ é o coeficiente de estresse hídrico para crescimento e expansão foliar e CCD é o coeficiente de crescimento do dossel para condições ideais (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$).

Início da senescência do dossel sob condições severas de estresse hídrico

$$Dr_{sen, sup} = p_{sen} CAD \quad (56)$$

em que, $Dr_{sen, sup}$ é o limite superior do esgotamento de água da zona radicular (mm); p_{sen} é a fração da CAD que pode ser esgotada da zona de raiz antes de acionada a senescência do dossel.

Ajuste do p_{sen} uma vez que a senescência é provocada

$$p_{sen,ajus} = p_{sen} \left(1 - \frac{\beta}{100} \right) \quad (57)$$

em que, $p_{sen,ajus}$ é a fração ajustada da CAD que pode ser esgotada da zona de raiz antes de acionada a senescência do dossel e β é um parâmetro do programa.

$$CDD_{ajus} = (1 - K_{s_{sen}}) CDD \quad (58)$$

em que, CDD_{ajus} é o coeficiente de declínio do dossel ajustado (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$); $K_{s_{sen}}$ é o coeficiente de estresse hídrico para senescência precoce do dossel e CDD é o coeficiente de declínio do dossel (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$).

$$CCD_{ajus} = K_{s_{exp,f}} CCD \quad (59)$$

em que, CCD_{ajus} é o coeficiente de crescimento do dossel ajustado para fertilidade do solo (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$); $K_{s_{exp,f}}$ é o coeficiente de estresse para fertilidade do solo.

$$CD_{x,ajus} = K_{s_{CDx}} CD_x \quad (60)$$

em que, $CD_{x,ajus}$ é a cobertura máxima do dossel ajustada para fertilidade do solo (d^{-1} ou $^{\circ}C d^{-1}$); $K_{s_{CDx}}$ é o coeficiente de estresse da fertilidade do solo para cobertura máxima do dossel.

ANEXO D

Tabela 1 - Parâmetros conservadores (constantes) e específico da cultura aplicados ao AquaCrop, utilizados para simulação da produtividade de milho para quatro épocas de semeadura na região de Arapiraca- AL, 2008.

Descrição	Valor	Unidades ou medidas
Conservador (aplicação geral)		
Temperatura base	10	°C
Temperatura máxima	30	°C
Cobertura do dossel por plântulas, 90% de emergência (cc_0)	5,0	cm ²
Coefficiente de crescimento do dossel (CCD)	15,3%	aumento diário da CD em relação a CD existente por GD† em função da densidade de plantas
Cobertura máxima do dossel (CD_x)	85%	
Coefficiente de transpiração da cultura até 100% CD	1,03	transpiração total do dossel em relação a ET_0
Coefficiente de declínio da cultura, depois de atingir a CD_x	8,0%	declínio por dia devido ao envelhecimento da folha
Coefficiente de declínio do dossel (CDD), até a senescência	0,010	redução da CD em relação a CD_x por GD
Produtividade de biomassa em relação ao uso da água para o ano 2000 (WP*)	33,7	g (biomassa) m ⁻² , em função da água transpirada (mm)
Limite de crescimento da folha ($p_{superior}$)	0,14	fração da CAD, acima deste o crescimento das folhas é inibido
Limite de crescimento da folha ($p_{inferior}$)	0,72	crescimento da folha para completamente neste p
Fator forma para coeficiente de estresse hídrico do crescimento foliar	2,9	curva moderadamente convexa
Limites da condutância estomática ($p_{superior}$)	0,69	acima deste, os estômatos começam a fechar
Coefficiente de estresse estomático (forma da curva)	6,0	curva altamente convexa
Coefficiente de estresse para senescência ($p_{superior}$)	0,69	acima deste, inicia a senescência do dossel
Coefficiente de estresse para senescência (forma da curva)	2,7	curva moderadamente convexa
Cultivar específica		
Índice de colheita de referência (IC_0)	50	comum para boas condições
GD, 90% de emergência até o início do florescimento	816	pode ser mais cedo para cultivares de estação curta
Duração do florescimento, em GD	120	-
Coefficiente de inibição do crescimento da folha sobre o IC	10,0	aumento do IC por inibição do crescimento da folha, durante o florescimento
Coefficiente de inibição do estômato sobre o IC	3,0	redução do IC por inibição do estômato, durante o florescimento
Total de GD da emergência para maturidade	1493-1518	

Fonte: (Autor, 2011)

† GD, Graus- dia de crescimento; IC- índice de colheita.