



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



MARSHALL VÍCTOR CHAGAS SANTOS

**DESEMPENHO DO MODELO APSIM EM CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE
DE MILHO EM ALAGOAS**

MACEIÓ - AL
2015

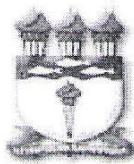
MARSHALL VICTOR CHAGAS SANTOS

**DESEMPENHO DO MODELO APSIM EM CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE
DE MILHO EM ALAGOAS**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Colegiado do curso de Pós-
Graduação em Meteorologia da
Universidade Federal de Alagoas –
UFAL, como requisito para a
obtenção do grau de Mestre em
Meteorologia.

ORIENTADOR: JOSÉ LEONALDO DE SOUZA

MACEIÓ - AL
2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-119.

*“DESEMPENHO DO MODELO APSIM EM CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE
MILHO EM ALAGOAS”*

Marshall Victor Chagas Santos

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

José Leonardo de Souza

Prof. Dr. José Leonardo de Souza
(Orientador)

Rosiberto Salustiano da Silva Junior

Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior
(Membro Interno)

Ricardo Araújo Ferreira Junior

Prof. Dr. Ricardo Araújo Ferreira Junior
(Membro Interno)

André Luiz de Carvalho

Prof. Dr. André Luiz de Carvalho
(Membro Externo – PNPD)

Fevereiro/2015

“A Deus, por me conceder sabedoria e discernimento. Aos meus pais, Arnaldo José dos Santos e Ana Maria Andrade Chagas Santos (In memoriam), pelos incentivos e investimentos que contribuíram para minha formação acadêmica e conclusão do mestrado. Aos meus irmãos Marcell Gustavo e Marcelle Tanylle, pelo apoio indispensável. A minha querida Cynthia Albuquerque pelo companheirismo.”

Ofereço e dedico.

“Na procura do conhecimento o primeiro passo é o silêncio, o segundo ouvir, o terceiro lembrar, o quarto praticar e o quinto ensinar aos outros.”

(Ibn Gabriol)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. José Leonaldo de Souza, pela oportunidade de ingressar na carreira científica e pelos ensinamentos que me foi dado.

Aos membros da banca examinadora, Dr. André Luis Carvalho, Prof. Dr. Rosiberto Salustiano e Prof. Dr. Ricardo Araújo Ferreira Junior, pelas indispensáveis contribuições ao presente trabalho.

Ao corpo docente do Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT) pelos ensinamentos e incentivos.

Ao Leandro Cerqueira, pelo compartilhamento de informações e material bibliográfico relacionados ao modelo APSIM.

Aos meus colegas de turma do mestrado, pelas contribuições e companheirismo, em especial aos amigos Mauro Bernasconi e Rodolfo Marcelo.

Aos meus companheiros do grupo de pesquisa do Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (LARAS): Adolpho Quintela, Ivomberg Magalhães, Joelmir Albuquerque, Pedro Luã Sarmiento e Renato Araújo, pelos aprendizados mútuos, companheirismo, amizade e momentos de descontração.

A CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsas, contribuindo para a realização desse trabalho.

RESUMO

A modelagem na agricultura é uma ferramenta de suporte na tomada de decisão e na gestão de sistemas de cultivos agrícolas em condições específicas. O APSIM (The Agricultural Production System SIMulator) é um modelo de sistemas agrícolas estruturado em módulos biológicos e ambientais, e permite ao usuário criar simulações com complexas práticas de manejo e sob diferentes condições ambientais. A cultura do milho (*Zea mays L.*) foi escolhida para exemplificar as simulações realizadas nesse estudo devido a sua ampla utilização nos mais variados setores socioeconômicos mundiais, em que também se destaca entre as culturas mais produzidas no Brasil. No Estado de Alagoas, o milho tem relevância principalmente para a agricultura familiar e sua produtividade é abaixo da média nacional, devido ao baixo nível tecnológico utilizados nos cultivos. No entanto, a utilização de modelos agrometeorológicos, associados a maiores níveis tecnológicos e manejo adequado podem contribuir para a otimização da produtividade na região. Com isso, objetivou-se no presente estudo, avaliar o modelo APSIM na simulação de variáveis de crescimento e de produção da cultura do milho no Estado de Alagoas. As regiões estudadas foram Arapiraca-AL e Rio Largo-AL, as quais o modelo foi avaliado com dados experimentais ambientais e da cultura. Inicialmente foram inseridos variáveis fenológicas referentes a variedade de milho utilizada experimentalmente (AL Bandeirante) e variáveis físicas, químicas e hídricas do solo, para que o modelo possa identificar e reproduzir a dinâmica de água no solo e processos de crescimento/desenvolvimento da cultura. O APSIM-Maize estimou o conteúdo de água no solo com diferença média entre os dados observados e simulados (RMSE) variando entre 0,021 e 0,053 mm mm⁻¹, em que, as estimativas para a região de Arapiraca-AL foram mais ajustadas as observações. Para Rio Largo-AL, os cálculos da dinâmica de água do solo foram influenciados por uma característica física do solo (camada adensada em torno de 30 cm) que foi identificada, mas não foi bem representada pelo modelo. Esse fator edáfico foi minimizado por ajustes no parâmetro de drenagem. O índice de área foliar (IAF) foi estimado com RMSE de 0,69 cm² cm⁻², e na maioria dos casos reproduziu adequadamente as observações até os 60 dias após a semeadura. Em algumas épocas de semeadura, a simulação do IAF foi eficiente durante todo o ciclo da cultura com baixos desvios percentuais. A produção de biomassa foi simulada com RMSE entre 2,04 e 3,33 Mg ha⁻¹ e apresentou grandes desvios durante os ciclos de crescimento da cultura, no entanto para os valores finais de biomassa o modelo teve estimativas satisfatórias com erros percentuais variando entre 3,52 e 35,16%. Portanto, o APSIM-Maize se mostrou um modelo confiável na estimativa dos componentes do balanço de água no solo. Mas, apresentou inconsistências, em alguns casos, para estimativas de variáveis de crescimento e de produção para as condições estudadas. A calibração aqui apresentada só é válida para as condições edafoclimáticas para quais o modelo foi testado, ou seja, o modelo não pode ser aplicado a todas as regiões do Estado de Alagoas, tendo em vista que o APSIM apresentou alta sensibilidade as mudanças ambientais e requer uma calibração específica para cada local.

Palavras-chave: Modelagem. Agrometeorologia. *Zea mays*.

ABSTRACT

The crop modelling is a support tool in decision making and management of agricultural cropping systems under specific conditions. The Agricultural Systems SIMulator (APSIM) is a model of agricultural systems, structured in biological and environmental modules, and allows users to create simulations with complex management practices and under different environmental conditions. The maize (*Zea mays L.*) was chosen to exemplify the simulations performed in this study due to its wide use in various worldwide socioeconomic sectors and also stands out among the crops most produced in Brazil. In the State of Alagoas, Northeastern Brazil, the maize is relevant mainly for family farms, and has productivity below the national average due to low technology used in cropping systems. However, the use of crop models, associated with higher levels of technology and appropriate management, can contribute to the optimization of productivity in region. Thus, the aim of this study, was evaluate the APSIM-Maize model to simulate growth and production variables of maize in the State of Alagoas, Brazil. The regions studied were Arapiraca-AL and Rio Largo-AL, in which the model was evaluated with edaphoclimatic data of regions. Initially were inserted phenological variables relating to maize variety used experimentally (AL Bandeirante), soil water parameters and physicochemical parameters for the model to identify and reproduce the soil water dynamics and growth process of the crop. The APSIM-Maize simulated the soil water content with average difference between observed and simulated data (RMSE) ranging between 0.021 and 0.053 mm mm⁻¹, wherein, the estimates for the Arapiraca-AL were better adjusted with observed data. For simulations in Rio Largo-AL, calculations of soil water dynamics were influenced by a physical characteristic of the soil (dense layer of soil at a depth of 30 cm) that was identified, but not well represented by the model. This edaphic factor was minimized by adjustments in the drainage parameter. The leaf area index (LAI) was estimated with RMSE of 0.69 cm² cm⁻², and in most cases adequately reproduces the observations until about 60 days after sowing. In some sowing dates, the simulations of the LAI was efficient throughout the crop cycle with low percentage deviations. Biomass production was simulated with RMSE between 2.04 and 3.33 Mg ha⁻¹, and had large deviations during the growth cycle of the culture, however for the final biomass production values the model has satisfactory estimates with percentage errors varying between 3.52 and 35.16%. Therefore, the APSIM-Maize proved to be a reliable model to estimate the components of the water balance in the soil. But showed inconsistencies in some cases to estimate growth and production variables for the conditions studied. The calibration presented here is only valid for edaphoclimatic conditions for which the model has tested, i.e., the model can not be applied to the Alagoas State as a whole, given that the APSIM model is sensitive to environmental changes and requires a specific calibration for each location.

Keywords: Modelling. Agrometeorology. *Zea mays*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de Alagoas com destaque às regiões de Arapiraca (1) Rio Largo (2), e respectivas fotos dos experimentos juntamente aos sistemas de aquisição de dados e sensores.	25
Figura 2 - Representação do balanço de água do solo e seus componentes considerados no modelo APSIM.	30
Figura 3 - Evaporação acumulada em função do tempo, descrevendo a sistemática do cálculo de evaporação no modelo APSIM-Maize.	31
Figura 4 - Irradiação solar global (H_g) [a] e temperaturas máximas (T_{max}), médias (T_{med}) e mínimas (T_{min}) [b] durante as quatro épocas de semeadura para a região de Arapiraca-AL, ano 2008.	40
Figura 5 - Irradiação solar global (H_g) (a) e temperaturas máximas (T_{max}), médias (T_{med}) e mínimas (T_{min}) [b] durante as quatro épocas de semeadura para a região de Rio Largo-AL, ano 2011.	40
Figura 6 - Conteúdo de água do solo (SW) na profundidade de 0 a 60 cm simulados (SW_{sim}) e observados (SW_{obs}), para as quatro épocas de semeadura do milho a) E1, b) E2, c) E3 e d) E4 na região de Arapiraca, AL.	42
Figura 7 - Conteúdo de água do solo (SW) na profundidade de 0 a 30 cm simulados (SW_{sim}) e observados (SW_{obs}), para as quatro épocas de semeadura do milho a) E1, b) E2, c) E3 e d) E4 na região de Rio Largo, AL.	44
Figura 8 - Simulação no APSIM da transpiração (TR), evaporação (E), transpiração acumulada (TR_{acum}) e evaporação acumulada (E_{acum}) no ciclo da cultura, para as quatro épocas de semeadura, na região de Arapiraca-AL em função dos graus-dia acumulados (GDA).	46
Figura 9 - Simulação no APSIM da transpiração (TR), evaporação (E), transpiração acumulada (TR_{acum}) e evaporação acumulada (E_{acum}) no ciclo da cultura, para as quatro épocas de semeadura, na região de Rio Largo-AL, em função dos graus-dia acumulados (GDA).	47
Figura 10 - Índice de área foliar simulados (IAF_{sim}) e observados (IAF_{obs}) em função dos Dias após a semeadura (DAS) para a cultura do milho na região de Arapiraca, AL.	49
Figura 11 - Índice de Área Foliar simulados (IAF_{sim}) e observados (IAF_{obs}) em função dos Dias após a semeadura (DAS) para a cultura do milho na região de Rio Largo, AL.	50
Figura 12 - Biomassa real (BM_{obs}) e simulado (BM_{sim}) e Rendimento de grãos real (Y_{obs}) e simulado (Y_{sim}) em função dos Dias Após a Semeadura (DAS) para a cultura do milho na região de Arapiraca, AL.	53

Figura 13 - Biomassa real (BM_{obs}) e simulado (BM_{sim}) e Rendimento de grãos real (Y_{obs}) e simulado (Y_{sim}) em função dos Dias Após a Semeadura (DAS) para a cultura do milho na região de Rio Largo, AL.....54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Datas de semeadura para as quatro épocas (E1, E2, E3, E4) referente aos experimentos de Arapiraca e Rio Largo.	26
Tabela 2 - Parâmetros físico-hídricos utilizados na criação do arquivo de solo no modelo APSIM-Maize.....	27
Tabela 3 - Parâmetros químico-orgânicos utilizados na criação do arquivo de solo no modelo.	27
Tabela 4 - Parâmetros fenológicos utilizados na calibração da variedade AL Bandeirante no modelo APSIM-Maize.....	29
Tabela 5 - Parâmetros utilizados para ajuste do Índice de Área Foliar (IAF).	29
Tabela 6 - Produção de biomassa final observada (BT_{OBS}) e simulada (BT_{SIM}) e rendimento de grãos observado (Y_{OBS}) e simulado (Y_{SIM}) para as regiões de Arapiraca e Rio Largo.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APSIM	The Agricultural Production System Simulator
APSRU	Unidade de Pesquisas de Sistemas de Produção Agrícola
CATI	Coordenadoria de Assistência Técnica Integral
CECA	Centro de Ciências Agrárias
CSIRO	Órgão nacional para pesquisa científica na Austrália
DAS	Dias após a sementeira
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
NEB	Nordeste do Brasil
TDR	Reflectometria no domínio do tempo
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

LISTA DE SÍMBOLOS

RFA	Radiação Fotossinteticamente ativa, MJ m ⁻² dia ⁻¹
Hg	Irradiação solar global, MJ m ⁻² dia ⁻¹
Hg _{acum}	Irradiação solar global acumulado durante o ciclo, MJ m ⁻² ciclo ⁻¹
EUR	Eficiência no uso da radiação, g MJ ⁻¹
T	Temperatura do ar, °C
T _{med}	Temperatura média do ar, °C
T _{máx}	Temperatura máxima do ar, °C
T _b	Temperatura base pra o desenvolvimento da cultura, °C
T _m	Temperatura máxima pra o desenvolvimento da cultura, °C
T _{opt}	Temperatura ótima pra o desenvolvimento da cultura, °C
tav	Temperatura média do ar anual, °C
amp	Amplitude de temperatura anual, °C
P	Precipitação, mm d ⁻¹
P _{acum}	Precipitação acumulada durante o ciclo, mm ciclo ⁻¹
UR	Umidade relativa, %
ET _o	Evapotranspiração de referência, mm
ET _c	Evapotranspiração da cultura, mm
IAF	Índice de área foliar
CO ₂	Dióxido de carbono
G	Duração do ciclo da cultura, dias
GD	Graus-dia, °C d ⁻¹
GDA	Graus-dia acumulados, °C ciclo ⁻¹
<i>metfile</i>	Arquivo de dados meteorológicos
N	Nitrogênio
NH ₄ NO ₃	Nitrato de Amônio
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
K ₂ O	Óxido de potássio
Zn	Zinco
SFS	Superfosfato simples
E1	Primeira época de semeadura
E2	Segunda época de semeadura

E3	Terceira época de sementeira
E4	Quarta época de sementeira
VE	Estádio fenológico da emergência
V4	Estádio fenológico da 4ª folha desenvolvida
V8	Estádio fenológico da 8ª folha desenvolvida
R1	Estádio fenológico do florescimento
R5	Estádio fenológico do início do enchimento de grãos
U	Quantidade de água evaporada na primeira fase de evaporação
CONA	Coefficiente de regressão para a segunda fase de evaporação
t	Tempo, horas.
E _s	Evaporação do solo, mm
E _{os}	Evaporação potencial diária do solo, mm
E _{acum}	Evaporação acumulada durante o ciclo, mm ciclo ⁻¹
E _{máx}	Evaporação máxima, mm
TR	Transpiração da cultura, mm
TR _{máx}	Transpiração máxima da cultura, mm
TR _{acum}	Transpiração da cultura acumulada durante o ciclo, mm ciclo ⁻¹
ΣE _s	Evaporação do solo acumulada, mm
FE	Frente de extração de água do solo, mm
∂FE	Taxa de progresso da FE
V _{FE}	Velocidade potencial da FE
Ω _{EV}	Fator de água no solo para o avanço da FE
kl	Fração de água disponível para as raízes, dia ⁻¹
C _i	Captação de água pelas raízes em uma camada “i”
SW	Conteúdo volumétrico de água no solo, mm mm ⁻¹
SW _{obs}	Conteúdo volumétrico de água no solo observado (TDR), mm mm ⁻¹
SW _{sim}	Conteúdo volumétrico de água no solo simulado, mm mm ⁻¹
SW _{supply}	Conteúdo total de água no solo, mm
SWCON	Condutividade de água no solo, d ⁻¹
DUL	Capacidade de campo, mm mm ⁻¹
LL	Ponto de murcha, mm mm ⁻¹
LL15	Ponto de murcha a 15bar, mm mm ⁻¹
airdry	Umidade no ponto de solo seco, mm mm ⁻¹
D	Difusividade hidráulica, mm mm ⁻¹

q	Fluxo de água no solo, mm mm^{-1}
$\partial SW/\partial x$	Gradiente de água no solo em umidade volumétrica, mm mm^{-1}
PLA	Área foliar de folhas verdes por planta, cm^{-2}
TPLA	Área foliar total por planta, cm^{-2}
TPLA	Valor máximo de TPLA, cm^{-2}
SPLA	Área foliar senescida por planta, cm^{-2}
IAF	Índice de área foliar, $\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$
k	Coefficiente de extinção de luz
TLN	Número total de folhas por planta
BM_T	Produção de biomassa limitada pela disponibilidade de água, Mg ha^{-1}
BM_{pot}	Produção de biomassa limitada pela energia radiante, Mg ha^{-1}
BM	Produção de biomassa, Mg ha^{-1}
BM_{obs}	Produção de biomassa observada, Mg ha^{-1}
BM_{sim}	Produção de biomassa simulada, Mg ha^{-1}
BT_{OBS}	Produção de biomassa total observada, Mg ha^{-1}
BT_{SIM}	Produção de biomassa total simulada, Mg ha^{-1}
Y	Rendimento de grãos, Mg ha^{-1}
Y_{obs}	Rendimento de grãos observado, Mg ha^{-1}
Y_{sim}	Rendimento de grãos simulado, Mg ha^{-1}
ERRO	Erro percentual, %
RMSE	Raíz quadrada do erro médio, Mg ha^{-1}
EF	Eficiência da modelagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 Aspectos gerais da cultura do milho	19
2.2 A Modelagem na Agricultura	20
2.3 O modelo APSIM	21
2.4 Variáveis meteorológicas e produtividade agrícola	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Localização e dados	25
3.2 Métodos de entradas no modelo APSIM-Maize	26
3.3 Opções de manejo no APSIM-Maize	28
3.4 Calibração do Índice de Área Foliar (IAF) e variedade utilizada	28
3.5 O Balanço de água no solo no APSIM	30
3.5.1 Evaporação	30
3.5.2 Captação de água pelas raízes	32
3.5.3 Transpiração	33
3.5.4 Movimento de água no solo	33
3.6 Fenologia da cultura	34
3.7 Desenvolvimento do dossel e índice de área foliar	35
3.8 Acúmulo e partição de biomassa	36
3.9 Análise de dados	37
3.9.1 Erro Percentual (ERRO)	37
3.9.2 Raíz Quadrada do Erro Médio (RMSE)	37
3.9.3 Eficiência de Modelagem (EF)	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Condições meteorológicas durante os ciclos da cultura	39
4.2 Balanço de água no solo	41
4.3 Transpiração e evaporação simuladas no APSIM	45
4.4 Índice de área foliar	48
4.5 Produção de Biomassa e Rendimento de grãos	52
5. CONCLUSÕES	56
6. REFERÊNCIAS	57
APÊNDICE A – Código-fonte da variedade AL Bandeirante inserido no modelo.	65

1. INTRODUÇÃO

A otimização de sistemas agrícolas é uma busca constante nas últimas décadas, impulsionada por uma maior demanda dos setores agroindustriais e bioenergéticos, devido ao acréscimo da população mundial. Assim, melhores resultados na produção de culturas agrícolas, proporcionam o surgimento de novas ferramentas para auxiliar produtores e pesquisadores na gestão de sistemas de cultivos. O modelo APSIM (The Agricultural Production System SIMulator) surgiu através de uma iniciativa combinada entre dois órgãos australianos que são o APSRU (Unidade de pesquisas em Sistemas de Produção Agrícola da Austrália) e CSIRO (Órgão nacional para pesquisa científica na Austrália), com o objetivo de desenvolver uma ferramenta para melhorar a eficiência de produção, auxiliar na gestão de riscos ambientais e oferecer uma maior sustentabilidade nos sistemas agrícolas da Austrália subtropical. O APSIM é um modelo de sistemas agrícolas que, através de um conjunto de módulos, permite a simulação de sistemas que cobrem uma gama de interações de plantas, animais, solo, clima e manejos agrícolas. O APSIM pode ser configurado para simular rotação de diferentes culturas, com complexas regras de manejo. O APSIM está sendo utilizado mundialmente, no entanto, ainda são poucas as pesquisas envolvendo simulações da cultura do milho.

A cultura do milho (*Zea Mays L.*), está entre as de maior valor socioeconômico, e por isso é muito estudada e produzida mundialmente. A produtividade mundial de milho saltou de 1,35 Mg ha⁻¹ (toneladas por hectare) no início da década de 60 para 3,86 Mg ha⁻¹ na safra de 2013 (FAO, 2015). Essa tendência de elevação deve permanecer, principalmente, pela recente utilização do milho como fonte alternativa da matriz energética. Nos EUA, parte da produção de milho está sendo destinada ao setor de biocombustíveis. No entanto, isso é pauta de discussões, devido à preocupação para que a produção destinada ao setor bioenergético não prejudique a produção de alimentos, tendo em vista o aumento populacional. O milho apresenta alta sensibilidade as variáveis meteorológicas/climáticas e as propriedades do solo que são componentes limitantes de sua produtividade. Tais fatores limitantes, associados a baixos níveis tecnológicos e práticas de manejo inadequadas, contribuem para que o Brasil tenha uma produtividade média histórica (1961-2013) de 2,3 Mg ha⁻¹, muito abaixo dos EUA (atual maior produtor mundial de milho) que possui produtividade média de 7,0 Mg ha⁻¹ (FAO, 2015).

No Nordeste Brasileiro (NEB), a maioria dos cultivos são realizados em regime de sequeiro e destinados à agricultura de subsistência. Devido a isso, a cultura do milho no NEB

apresenta baixos índices de produtividade, com uma média histórica (1976/1977-2012/2013) em torno de 0,84 Mg ha⁻¹. Na safra 2012/2013 o NEB teve um rendimento de aproximadamente 2,0 Mg ha⁻¹. O Estado de Alagoas acompanha as baixas produtividades do NEB, com rendimento de grãos médio de 0,53 Mg ha⁻¹, abaixo da média nacional de 2,3 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2014). No entanto, esses valores oficiais não representam o potencial produtivo da região, tendo em vista que, em sistemas de produção conduzidos de maneira adequada (recursos técnico/tecnológico) na região de Arapiraca (agreste de Alagoas), resultaram em níveis de produtividade em torno de 6,0 Mg ha⁻¹, para variedades (Ferreira Junior *et al.*, 2014).

Uma ferramenta atual que auxilia a busca de melhores resultados e eficiência de produção, são os modelos de sistemas agrícolas, que simulam e detalham os processos de desenvolvimento, fotossíntese, respiração, dentre outros. Os modelos permitem aos agricultores e pesquisadores acompanhar os fatores de influência sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura, que é suporte na tomada de decisão para evitar prejuízos econômicos, além de proporcionar uma visão antecipada sobre a produção da cultura. A modelagem também traz para a agricultura uma maior sustentabilidade no planejamento agrícola, tendo em vista que auxilia na redução de custos de produção e na utilização de recursos naturais minimizando os danos ao meio ambiente. O presente trabalho tem por objetivo, calibrar e avaliar o desempenho do modelo APSIM-Maize na simulação de variáveis de crescimento e de produção para cultivos de milho em duas regiões do Estado de Alagoas. E como objetivos específicos determinar: 1) balanço de água no solo; 2) índice de área foliar; 3) produção de biomassa e rendimento de grãos, para duas regiões de Alagoas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é responsável por alavancar diversos setores agroindustriais devido à natureza das reservas energéticas acumuladas em seu grão (Fancelli & Dourado Neto, 2004). É uma cultura de origem tropical que se desenvolve com altas taxas fotossintéticas, e por isso é preferencialmente cultivado em climas quentes para expressar seu potencial produtivo. Os fatores ambientais modificam seus processos vegetativos e reprodutivos, e por consequência pode prejudicar o desenvolvimento da cultura (Magalhães *et al.*, 2002). O milho é produzido em climas que variam de zona temperada à tropical, em que as temperaturas médias diárias são geralmente superiores a 15°C sem risco de geadas (Dorrenboos & Kassam, 1979; Gourdjji *et al.*, 2015)

A produção brasileira de milho apresenta uma tendência de elevação desde o fim da década de 80 (FAO, 2012). A principal justificativa para tal crescimento é a eliminação de tarifas sobre produtos importados no início da década de 90 que ocasionou o aumento das importações, principalmente de países do Mercosul. Devido a maior competição com o mercado das importações, houve a preocupação e necessidade por parte dos produtores brasileiros em buscarem aumentos contínuos de produtividade, o que resultou no crescimento da produção nacional (Calderelli & Bacci, 2010). A produtividade de milho no Brasil aumentou de 3,4 Mg ha⁻¹ para 4,3 Mg ha⁻¹ entre os anos de 2001 a 2010. Países como Estados Unidos da América (EUA) e China (principais produtores mundiais de milho) também obtiveram o mesmo aumento, porém, possuem rendimentos superiores, quando comparado ao Brasil. Os EUA saltou de 8,6 Mg ha⁻¹ para 9,5 Mg ha⁻¹ e China obteve um crescimento de 4,5 Mg ha⁻¹ para 5,4 Mg ha⁻¹ durante o referido período (FAO, 2012).

O milho é cultivado em variadas regiões do mundo, com área cultivada de 164 milhões de hectares no ano de 2010 (Steduto *et al.*, 2012). As maiores áreas de cultivo de milho pertencem a China com aproximadamente 33,5 milhões de hectares (10⁶ ha) e EUA (33,0 10⁶ ha), seguido de países como o Brasil (12,6 10⁶ ha), Índia (8,0 10⁶ ha), México (7,0 10⁶ ha) e Argentina (3,0 10⁶ ha). Os continentes africano e europeu também se destacam com grandes áreas cultivadas de 31,7 e 14,0 10⁶ ha, respectivamente (FAO, 2012).

2.2 A Modelagem na Agricultura

A implementação da modelagem na agricultura, com a finalidade de modelar as taxas fotossintéticas de culturas agrícolas foi iniciada nos anos 60 por de Wit (1965). A partir de então, pesquisas que visam uma melhor performance na reprodução de sistemas agrícolas através de modelos biofísicos foram intensificadas (Muchow *et al* 1990; Carberry, *et al.*, 1993; Santos, 2013). Com o avanço tecnológico a partir da década de 80, os modelos de sistemas agrícolas foram aprimorados, principalmente no que se diz respeito à criação de interfaces que permitam aos usuários uma melhor adaptação e compreensão às simulações, como é o caso de modelos como o AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009), APSIM (Keating *et al.*, 2003) DSSAT (Jones *et al.*, 2003), Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004), que possuem interface de usuário amigável, oferecendo uma criação e visualização das simulações sem a necessidade do entendimento de técnicas de programação. O modelo CERES-Maize (Jones & Kiniry, 1986) foi um dos primeiros modelos estruturados destinado a simulação de crescimento da cultura do milho, no qual a maioria dos seus sucessores (Yang *et al.*, 2004a; Keating *et al.*, 2003; Jones *et al.*, 2003) herdaram muito de suas formulações e parâmetros que ainda são comumente utilizados.

Os modelos de simulação do crescimento/desenvolvimento das culturas tentam contornar a obrigatoriedade de testar experimentalmente os ensaios envolvendo as variáveis do sistema solo-planta-atmosfera. Uma definição que representa muito bem essa ferramenta foi sugerida por de Wit (1982), que define um modelo como a representação simplificada de um sistema, e simulação como uma arte de construir modelos. No entanto, Hoogenboom (2000) define modelo como uma simplificação de um sistema do mundo real, ou seja, incluiu a palavra “simplificação” em sua definição pelo fato de não ser possível considerar todas as interações entre o ambiente e o sistema modelado. Nesse contexto, modelo determinístico é quando dadas às condições experimentais pode-se prever o resultado final do experimento utilizando coeficientes definidos, e modelo estocástico associa-se variáveis aleatórias (métodos probabilísticos) para cada saída no resultado antes da realização do experimento (Bai, *et al*, 2007).

Além dos modelos determinísticos e estocásticos, Murth (2004) classifica outros tipos de modelos, que podem ser: 1) modelos estatísticos, em que as relações do sistema modelado são simuladas utilizando técnicas estatísticas, como por exemplo, regressões e correlações. 2) modelos mecânicos, que utilizam um mecanismo que definem a relação da influencia de variáveis dependentes baseado em um conjunto de representações físicas. 3) modelos

dinâmicos, quando o tempo é incluído como uma variável, ou seja, tanto as variáveis dependentes ou independentes tem valores que permanecem constantes ao longo de um dado período de tempo. 4) modelos estáticos, quando o tempo não é incluído como uma variável. Nesse caso, as variáveis dependentes e independentes possuem valores que permanecem constantes ao longo de um dado período de tempo. 5) modelos de simulação, que são modelos computacionais, em geral, expressam uma representação matemática de um sistema do mundo real. Nesse caso, o modelo tem por objetivo principal estimar a produção agrícola por meio de conjuntos de equações diferenciais e cálculo das variáveis de crescimento, normalmente desde o plantio até a colheita.

Todos os modelos agrometeorológicos, necessitam de entradas que representem a componente atmosférica. Em geral, as variáveis meteorológicas como temperatura do ar, precipitação e a radiação solar são as entradas principais dos modelos de simulação. Hoogenboom (2000) as considera como “variáveis primárias” e as demais, tais como, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, evaporação do tanque classe A, temperatura do solo, dentre outros, como “variáveis secundárias”. Os modelos de simulação de culturas agrícolas são desenvolvidos a fim de atender várias demandas no ramo da meteorologia agrícola, como por exemplo, o suporte ao agricultor na gestão de culturas em condições desfavoráveis, com solos pobres em nutrientes e climas severos, e oferecer aos pesquisadores uma ferramenta útil para encontrar soluções nos complexos problemas do sistema solo-planta-atmosfera e auxiliar aos políticos e administradores na gestão da meteorologia agrícola (Murthy, 2004).

2.3 O modelo APSIM

No início da década de 90 a Divisão de Culturas Tropicais do CSIRO (órgão nacional para pesquisa científica na Austrália) e a Unidade de Pesquisas de Sistemas de Produção Agrícola (APSRU), se uniram para desenvolver ferramentas que ofereçam aos clientes de sistemas agrícolas, uma melhor eficiência de produção, gestão de riscos e maior sustentabilidade nos cultivos na região da Austrália subtropical (McCown *et al.*, 1995). A partir disso, o APSRU reuniu dois modelos de cultivos já existentes. O primeiro foi o PERFECT (Littleboy *et al.*, 1992), desenvolvido principalmente para simulações dos efeitos da erosão sobre a produtividade dos vertissolos nos subtrópicos australianos, influenciado pelo manejo de solo. Mas, é muito utilizado em pesquisas operacionais em sistemas agrícolas. O segundo modelo foi o AUSIM (McCown & Williams, 1989; McCown *et al.*, 1995), desenvolvido para pesquisas nos trópicos semiáridos australianos e africanos, particularmente

no que se diz respeito aos cultivos de rotações e consórcios de grãos e legumes. Desde a formação do APSRU, desenvolve-se um novo modelo baseado em seus precursores (PERFECT e AUSIM) e nas experiências adquiridas com o desenvolvimento de ambos. Esse novo modelo é o APSIM (Keating *et al.*, 2003), que foi desenvolvido para auxiliar a busca por melhores resultados e estratégias na agricultura para gerenciamento de riscos e tomada de decisão mais eficaz.

O APSIM (The Agricultural Production System SIMulator) é uma plataforma computacional de modelagem de sistemas de cultivos estruturado em módulos que são separados em dois grandes grupos. Primeiro, o biológico, em que se inserem os módulos das culturas, pastos e resíduos superficiais. Segundo, o ambiental, que abrange o módulo meteorológico, de solo, entre outros. Cada módulo do APSIM possui um processo de simulação específico e se comunica com outros módulos através de um mecanismo central de simulação. Os módulos são completamente autossuficientes e responsáveis por sua própria leitura de parâmetros e configuração interna. O APSIM permite ao usuário escolher diferentes combinações de módulos em conjunto para configurar diferentes simulações. Atualmente, o modelo é utilizado mundialmente em pesquisas relacionadas a sistemas agrícolas e seus componentes (Archountoulis *et al.*, 2014; Nair *et al.*, 2012; Snow *et al.*, 2007). Essa aplicação em âmbito mundial da plataforma APSIM, se deve, principalmente a duas características importantes. Primeiro, o modelo possui uma interface amigável, que oferecem flexibilidade tanto em simulações simples, quanto complexas, sem a necessidade de escrever códigos adicionais. Segundo, o APSIM, simula diferentes situações de produção, incluindo potencial e atingível (limitado por água, manejo ou nutrientes), incluindo outras situações reais (competição com ervas daninhas) para mais de 30 espécies, incluindo culturas de rotação (Keating *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2002).

2.4 Variáveis meteorológicas e produtividade agrícola

A produtividade das culturas agrícolas é dependente da combinação entre fatores genéticos, ambientais (climáticas e edáficas) e de manejo. Entre os principais fatores que limitam o rendimento das culturas está inserido as condições meteorológicas/climáticas. O pleno crescimento/desenvolvimento das culturas, assim como o seu potencial produtivo depende de condições ótimas de radiação solar, temperatura do ar e disponibilidade de água (precipitação ou irrigação). O milho é influenciado por todos estes elementos, que atuam eficientemente nas atividades fisiológicas e afetam diretamente a fenologia, produção de matéria seca e de grãos.

A radiação solar, de acordo com formulação proposta por Muchow *et al.* (1990), descreve o potencial produtivo da cultura do milho em condições ótimas de manejo, água e nutrientes. E por isso, essa variável meteorológica se destaca em pesquisas que visam o rendimento potencial das plantas cultivadas através de uma melhor recepção de radiação solar pelo dossel e maior eficiência de conversão em biomassa (Andrade *et al.*, 1993; Marchão 1994; Sinclair & Muchow, 1999; Freitas *et al.*, 2001; Kunz *et al.*, 2007; Ferreira Junior *et al.*, 2014). A faixa da radiação solar atuante na fotossíntese é denominada de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), que no espectro solar está compreendida entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nm (nanômetros). A RFA é absorvida pelo tecido clorofilado das folhas e, em seguida, utilizada na transformação do dióxido de carbono (CO₂) em carboidratos, através do processo fotossintético, resultando no crescimento dos vegetais. A cultura do milho apresenta taxa fotossintética elevada, ou seja, um aumento na disponibilidade de RFA, até certo limite, induz a planta a uma maior eficiência na conversão da radiação solar em biomassa resultando em rendimentos mais elevados. Além disso, o milho possui uma elevada eficiência no uso da radiação solar (EUR) que é atribuída a anatomia da sua folha, por apresentar menor área entre as nervuras e lamela suberizada, o que minimiza a perda de CO₂ para a atmosfera (Hattersley, 1984; Christin *et al.*, 2012).

A disponibilidade térmica afeta diretamente a fenologia e rendimento de grãos das plantas cultivadas (Muchow *et al.*, 1990; Andrade *et al.*, 1993; Gadioli *et al.*, 2000), de tal maneira que em determinados locais ou épocas do ano que se dispõe de temperaturas mais elevadas até certo limite, ocorre uma aceleração no desenvolvimento das culturas, reduzindo o intervalo para atingir os estádios fenológicos. Por outro lado, baixas temperaturas tendem a retardar o processo fenológico da cultura, estendendo o período entre os estádios. A primeira tentativa de relacionar a fenologia das culturas com a temperatura do ar, foi feita pelo Físico Reaumur, em 1735, no qual sugeriu que a soma das temperaturas médias diárias do ar para a ocorrência de um determinado estágio de desenvolvimento era praticamente constante para uma espécie de planta. Então, surgiu o conceito de graus-dia (GD) também conhecido como unidades de calor ou sistema de unidades térmicas (Souza, 1989). Esse conceito melhorou o entendimento da duração dos eventos fenológicos das culturas agrícolas, que até então demonstrava inconsistência, devido ao fato de que a duração de subperíodos e ciclos das plantas estarem associados às variações nas condições ambientais e não ao número de dias. A temperatura do ar também influencia na cultura do milho de diversas outras maneiras, principalmente na absorção de água do solo através do sistema radicular, atividade fotossintética, transpiração e translocação dos produtos fotossintéticos. Essa variável

meteorológica se apresenta como a mais importante para descrever a fenologia das culturas, desde que não haja deficiência hídrica (Gadioli *et al.*, 2000).

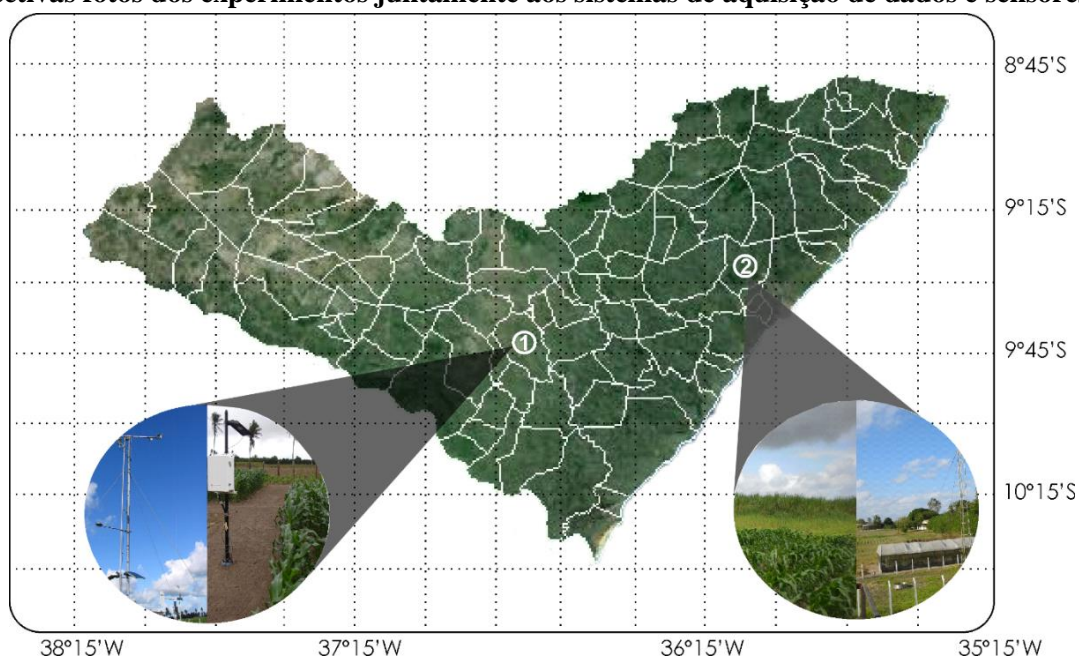
A água é um recurso essencial na otimização da produção agrícola (assim como o seu uso racional), pois sua disponibilidade proporciona variações na produtividade da cultura e altera a qualidade do produto (Abedinpour *et al.*, 2012). As formas em que o déficit hídrico afeta o crescimento e o rendimento das culturas, variam de acordo com a espécie e estágio fenológico de ocorrência. O milho possui um consumo de água geralmente oscilando entre 4 e 6 mm dia⁻¹ e exige no mínimo de 400-600 mm de precipitação pluvial durante o seu ciclo para permitir alcançar seu potencial produtivo, podendo variar de acordo com a região e condições edafoclimáticas. (Doorenbos & Kassam, 1979; Kong *et al.*, 2012). As fases da cultura com maiores exigências hídricas são a emergência, florescimento e enchimento de grãos (Fancelli & Dourado Neto, 2004). No entanto, Bergamaschi *et al.* (2004) observaram que independente das condições climáticas da região, a produtividade de grãos de milho é decorrente das condições hídricas durante o período crítico entre o pendoamento e o início do enchimento de grãos. No NEB, a maioria dos cultivos são destinados à agricultura de subsistência e em regime de sequeiro. Por esse motivo, é importante conhecer o regime pluviométrico da região, para realizar a semeadura nas épocas em que a precipitação coincida com as fases que cultura necessita de maior disponibilidade hídrica, permitindo assim rendimentos mais elevados. Lyra *et al.* (2010) relata que no Estado de Alagoas, a cultura do milho é semeada preferencialmente no início do período úmido (maio e junho), assegurando (conforme o regime de precipitação local) que o ciclo da cultura ocorra sob condições hídricas favoráveis ao seu crescimento e desenvolvimento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e dados

Os dados meteorológicos e da cultura do milho utilizados nas simulações de crescimento e desenvolvimento através do modelo APSIM-Maize (Versão 7.6) foram oriundos de dois experimentos realizados em regime de sequeiro no Estado de Alagoas (Figura 1). O primeiro foi conduzido no povoado Batingas, região de Arapiraca-AL ($09^{\circ}48'55,1''S$; $36^{\circ}36'22,8''W$; 260m) que possui um clima megatérmico; sub-úmido seco, com grande deficiência de água no verão e excesso de água moderado no inverno de acordo com a classificação de Thornthwaite. O segundo experimento foi realizado no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), no município de Rio Largo-AL ($09^{\circ}28'02''S$; $35^{\circ}49'43''W$; 127m) com clima úmido (B1), megatérmico quente (A') com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w2). Os experimentos foram compostos por quatro épocas de semeadura (E1, E2, E3 e E4) que estão descritas na Tabela 1. A variedade de milho utilizada foi a AL Bandeirante desenvolvida pelo Departamento de Sementes, Mudas e Matrizes da CATI para ambos experimentos. Maiores detalhes experimentais podem ser encontrados em Medeiros (2009) e Silva (2013), respectivamente, para o experimento 1 e 2 (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de Alagoas com destaque às regiões de Arapiraca (1) Rio Largo (2), e respectivas fotos dos experimentos juntamente aos sistemas de aquisição de dados e sensores.



Fonte: Autor (2015).

Os dados ambientais de irradiação solar global (obtidos por um Piranômetro CM3 da Kipp & Zonen), temperatura e umidade do ar (medidos através de sensores HMP45C – Vaisala Inc.), velocidade do vento (obtido por um sensor Wind Monitor, 05103-5 / Young, Campbell Sci.), Precipitação (medido por um sensor TB3, Hydrological Service PTY. LTD., Sydney, Austrália) e umidade do solo (obtido por TDR – CS616, Campbell Sci., Logan, Utah) foram obtidos por sistemas automáticos de aquisição de dados (CR1000 – Campbell Sci.), em ambos os experimentos.

Tabela 1 - Datas de semeadura para as quatro épocas (E1, E2, E3, E4) referente aos experimentos de Arapiraca e Rio Largo.

Época de semeadura	Local	
	Arapiraca Ano 2008	Rio Largo Ano 2011
E1	14/06	06/05
E2	22/06	19/05
E3	28/06	10/06
E4	05/07	30/06

3.2 Métodos de entradas no modelo APSIM-Maize

O APSIM necessita de dois arquivos de entrada principais para iniciar a simulação, que consiste nos arquivos meteorológicos diários e de solo. Estes foram formatados de acordo com as exigências do modelo. Os dados de entrada no arquivo meteorológico (*metfile*) foram: temperatura média anual (tav, °C), amplitude térmica anual (amp, °C), dados de posicionamento geográfico (latitude e longitude, em graus), além de dados diários de temperatura do ar máximas e mínimas (°C), umidade relativa do ar (%), precipitação (mm), irradiação solar (MJ m⁻²) e velocidade do vento (m s⁻¹). Os dados utilizados na criação dos arquivos meteorológicos foram de estações meteorológicas automáticas correspondentes a cada região de estudo.

O arquivo de solo pode ser elaborado através da ferramenta APSoil, oferecida pelo APSIM. O APSoil foi utilizado para a elaboração dos arquivos de solo, que foram criados para as duas regiões estudadas, com base em dados de análises experimentais do solo. Esse arquivo é constituído por submódulos, em que no primeiro denominado “Water” foram inseridos dados das características hidrofísicas do solo (densidade do solo, conteúdo de água do solo na saturação, conteúdo de água do solo na capacidade de campo e conteúdo de água do solo no ponto de murcha permanente, dentre outros). O segundo submódulo “SoilWat” é um modelo de balanço hídrico inserido no APSIM com base em seus precursores CERES (Jones & Kiniry, 1986) e PERFECT (Littleboy *et al*, 1992) e requer parâmetros específicos para o cálculo dos componentes do balanço de água no solo, que foram mantidos os padrões

do modelo. O terceiro submódulo “SoilOrganicMatter” consiste em dados referentes à matéria orgânica do solo, onde também foram mantidos os valores do modelo. O quarto submódulo “Analysis” é destinado aos dados da composição química do solo, em que, nesse caso foram inseridos dados de análises químicas das regiões estudadas (Tabela 3). Por último, o quinto submódulo, denominado “Fertiliser” considera o nitrogênio inicial contido no solo, em que os valores foram utilizados conforme Probert *et al.*, (1998).

O solo da região experimental de Arapiraca-AL é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, de textura franco-arenosa, e densidade média de $1,35 \text{ g cm}^{-3}$, na profundidade de 0 a 60 cm. Para essa região, a profundidade do sistema radicular considerada no modelo foi de 60 cm, de acordo com observações de Medeiros (2009). O solo da área experimental de Rio Largo-AL é classificado como Latossolo Amarelo Coeso Argiloso de textura médio-argilosa, com densidade média de $1,44 \text{ g cm}^{-3}$, na profundidade de 0 a 30 cm. Maiores detalhes sobre os dados físico-hídricos dos solos experimentais estão descritos na Tabela 2 e 3.

Tabela 2 - Parâmetros físico-hídricos utilizados na criação do arquivo de solo no modelo APSIM-Maize.

Prof. cm	DS g cm^{-3}	LL15		DUL mm mm^{-1}	SAT
Arapiraca-AL					
0-30	1,33	0,063		0,102	0,400
30-60	1,38	0,076		0,113	0,390
Rio Largo-AL					
0-10	1,36	0,12		0,20	0,40
10-20	1,44	0,13		0,22	0,43
20-30	1,52	0,14		0,24	0,43

DS – Densidade do solo; LL15 – Conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente; DUL – Conteúdo de água no solo na capacidade de campo; SAT – Conteúdo de água no solo na saturação.

Fonte: Laboratório de solos, CECA/UFAL.

Tabela 3 - Parâmetros químico-orgânicos utilizados na criação do arquivo de solo no modelo.

Prof. cm	NH ₄ mg kg^{-1}	NO ₃ mg kg^{-1}	CO %	FBIOM (0-1)	FINERT (0-1)	pH (água)
Arapiraca-AL						
0-30	3,30	6,45	2,66	0,023	0,46	5,23
30-60	0,78	0,99	0,99	0,010	0,62	4,30
Rio Largo-AL						
0-10	1,30	1,75	1,03	0,035	0,39	5,52
10-20	1,00	2,58	0,86	0,020	0,47	5,10
20-30	1,00	2,12	0,77	0,015	0,52	5,00

NH₄ – Amônio inicial; NO₃ – Nitrato inicial; CO – Carbono orgânico; FBIOM – Proporção de CO inicial, assumindo que seja inerte; FINERT – Proporção da fração de biomassa do CO total (BIOM), não inerte.

Fonte: Probert *et al.* (1988) e Laboratório de solos, CECA/UFAL.

3.3 Opções de manejo no APSIM-Maize

As práticas de manejo agrícola foram programadas no APSIM pelo módulo “*operations schedule*”, que permite criar uma cronologia e programar todas as operações através de comandos. O manejo nutricional foi inserido através do comando “*fertiliser apply amount*” indicando a quantidade de adubação, fonte e profundidade. As adubações foram reproduzidas no modelo de maneira a representar as operações experimentais, considerando as adubações de fundação e de cobertura.

No experimento de Arapiraca-AL a adubação de fundação foi efetuada utilizando 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), 60 kg ha⁻¹ de pentóxido de fósforo (P₂O₅), 50 kg ha⁻¹ de óxido de potássio (K₂O) e 2 kg ha⁻¹ de zinco (Zn) e a de cobertura foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de N. Para a experimentação de Rio Largo-AL, a adubação de fundação foi aplicada utilizando 10 kg ha⁻¹ de N, 60 Kg ha⁻¹ de P e 45 kg ha⁻¹ de K e a de cobertura aplicou-se 60 kg ha⁻¹ de N, nas quais as fontes desses nutrientes foram sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄), superfosfato simples (SFS) e cloreto de potássio (KCl). No entanto, o modelo só contempla fontes nutricionais baseadas em nitrogênio (N) e fósforo (P), e por esse motivo as adubações com fontes de potássio (K) não foram consideradas na programação do manejo nutricional. A adubação de fundação no modelo foi programada para o início da simulação, e as de cobertura foram divididas em duas aplicações, correspondentes aos estádios fenológicos V4 (4^a folha desenvolvida) e V8 (8^a folha desenvolvida), conforme as práticas realizadas experimentalmente. A fonte de N utilizada no modelo foi o nitrato de amônio (NH₄NO₃) que possui cerca de 34% de N. Em virtude do APSIM não contemplar o sulfato de amônio como fonte de N foi necessário ajustar a quantidade de NH₄NO₃ inserida no modelo, para corresponder à aplicação de N experimental. Após esse ajuste de N, a quantidade da adubação programada para Arapiraca-AL foi de 117,6 kg ha⁻¹ de NH₄NO₃ na fundação e 206 kg ha⁻¹ de NH₄NO₃ para cada aplicação de cobertura. Em Rio Largo 29,4 kg ha⁻¹ de NH₄NO₃ na fundação e 88,2 kg ha⁻¹ de NH₄NO₃ para cada aplicação de cobertura.

3.4 Calibração do Índice de Área Foliar (IAF) e variedade utilizada

A plataforma APSIM não dispõe da variedade utilizada nos experimentos (AL Bandeirante), devido a isso, foi necessário inseri-la no modelo. Essa inserção foi realizada no arquivo *maize.xml*, no qual consta todas as informações utilizadas na simulação do crescimento do milho. Os parâmetros requeridos pelo APSIM para o tipo de variedade/híbrido, são relacionados, principalmente, a sua fenologia. As alterações para

representar a variedade utilizada foram referentes aos graus-dia acumulados (GDA) entre a emergência e o fim do estágio juvenil (*tt_emerg_to_endjuv*), GDA entre a floração e maturação (*tt_flower_to_maturity*); GDA entre o lançamento da folha bandeira e o florescimento (*tt_flag_to_flower*), GDA do florescimento ao enchimento de grãos (*tt_flower_to_start_grain*); GDA entre a maturação e a colheita (*tt_maturity_to_ripe*). Esses valores foram obtidos através da fenologia da variedade utilizada. O APÊNDICE A descreve o código que representa essas modificações (inserido no arquivo *maize.xml*), e os valores dos parâmetros fenológicos utilizados estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros fenológicos utilizados na calibração da variedade AL Bandeirante no modelo APSIM-Maize.

Parâmetro	Valor utilizado	Descrição
1. <i>tt_emerg_to_endjuv</i>	196.08	GDA entre a emergência e o fim do estágio juvenil.
2. <i>tt_flower_to_maturity</i>	488.1	GDA entre a floração e maturação.
3. <i>tt_flag_to_flower</i>	10	GDA entre o lançamento da folha bandeira e o florescimento.
4. <i>tt_flower_to_start_grain</i>	68,5	GDA do florescimento ao enchimento de grãos.
5. <i>tt_maturity_to_ripe</i>	1	GDA entre a maturação e a colheita.

1 – GDA entre a emergência e a 4ª folha totalmente expandida (V4); 2 – GDA entre o florescimento (R1) à maturação fisiológica (R6); 3 – GDA entre dois dias após o pendoamento (VT) e o florescimento (R1); 4 – GDA entre o florescimento (R1) e o início enchimento de grãos (R2); 5 – GDA entre a maturação fisiológica (R6) e a colheita.

Fonte: Autor (2015)

As modificações para o ajuste do Índice de área foliar (IAF), foram realizadas nos parâmetros: 1) “*x_lai*”, que representa a variação do IAF, e foi modificado baseado em observações experimentais, em que, o valor máximo experimental (IAF = 5,6) ultrapassou o máximo valor previamente considerado pelo modelo (IAF = 4,0). 2) “*leaf_no_dead_slope*”, que foi alterado para representar o decaimento da curva do IAF, conforme metodologia adotada por Archontoulis *et al.* (2014). 3) “*lai_sen_light*”, que indica quando a senescência induzida ocorre, e foi modificado pelo mesmo motivo do parâmetro “*x_lai*”. A Tabela 5 mostra os valores que foram utilizados.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados para ajuste do Índice de Área Foliar (IAF).

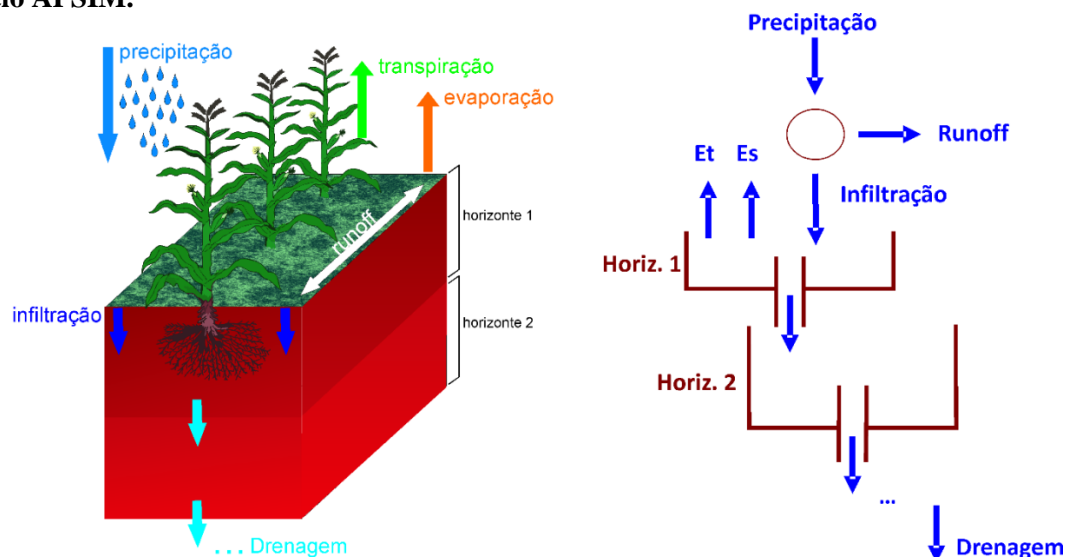
Parâmetro	Valor APSIM	Valor utilizado	Descrição
<i>x_lai</i>	0.1 – 4.0	0.1 – 6.0	Variação do IAF
<i>leaf_no_dead_slope</i>	0.00035	0.0002	Declive da curva do IAF
<i>lai_sen_light</i>	4.0	6.0	Ocorrência da senescência induzida

Fonte: Autor (2015)

3.5 O Balanço de água no solo no APSIM

O APSIM possui dois métodos de cálculo do balanço de água no solo, o primeiro é através do módulo “*SoilWater*” (Probert *et al.*, 1998) que é um modelo estratificado em camadas e o segundo consiste no módulo “SWIM” que é baseado na equação de Richard’s (Verberg *et al.*, 1996). Nesse estudo, foi utilizado o módulo “*SoilWater*”, que calcula o balanço de água no solo em uma escala de tempo diário e por camadas, incluindo os processos de evaporação do solo, transpiração da planta, drenagem e escoamento superficial (Figura 2). Os parâmetros padrões do APSIM para a evaporação do solo, escoamento superficial e eficiência de transpiração da cultura do milho foram mantidos.

Figura 2 - Representação do balanço de água do solo e seus componentes considerados no modelo APSIM.



Fonte: Autor (2015)

3.5.1 Evaporação

A evaporação do solo no APSIM é calculada em duas fases, a primeira constante e a segunda considerando uma taxa de depleção de acordo com a metodologia proposta por Ritchie (1972). Na primeira fase, o solo é suficientemente úmido para que a água seja transferida da superfície do solo para a atmosfera a uma taxa de evaporação potencial. A segunda fase ocorre quando o teor de água no solo diminui para um limiar abaixo da evaporação potencial. Estes comportamentos são descritos no módulo “*Soil Water*” através da utilização dos parâmetros U e CONA. O parâmetro U representa a quantidade evaporada antes do fornecimento de água ser reduzido abaixo da demanda atmosférica (primeira fase), ou seja, U é o somatório da quantidade evaporada na primeira fase (Equação 1).

$$\sum E_s = U \quad (1)$$

A taxa de evaporação do solo (E_s) durante a segunda fase é especificada pelo coeficiente de regressão CONA como uma função do tempo (Equação 2), onde inicia-se a partir do final da primeira fase de evaporação.

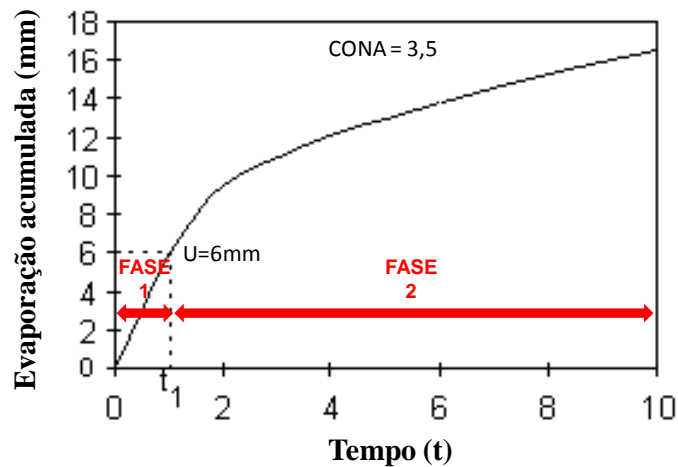
$$E_s = \text{CONA} \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

A água perdida por evaporação é removida a partir da camada superficial, em que essa camada pode secar abaixo do ponto de murcha (LL) para a umidade de solo seco (*airdry*), abaixo de LL. A Figura 3 exemplifica o acúmulo de água evaporada em função do tempo, nas condições de $U = 6 \text{ mm}$ e $\text{CONA} = 3,5$ e é possível confirmar no gráfico as condições mencionadas a seguir (Equação 3 e 4), onde a evaporação potencial diária do solo (E_{os}) é igual à evaporação do solo (E_s) na primeira fase de evaporação ($t \leq t_1$), e a partir da segunda fase ($t > t_1$) a evaporação acumulada (ΣE_s) é dado pela soma entre evaporação acumulada na primeira fase e a raiz quadrada do tempo multiplicado pelo parâmetro CONA (representando a segunda fase de evaporação).

$$\text{Se } t \leq t_1 ; E_s = E_{os} \quad (3)$$

$$\text{Se } t > t_1 ; \Sigma E_s = U \cdot t + \text{CONA} (t - t_1)^{1/2} \quad (4)$$

Figura 3 - Evaporação acumulada em função do tempo, descrevendo a sistemática do cálculo de evaporação no modelo APSIM-Maize.



Fonte: Autor (2015) adaptado de APSIM (2015b)

3.5.2 Captação de água pelas raízes

A captação de água do solo pelas plantas depende da profundidade da frente de extração de água do solo e da capacidade de extração da água disponível no solo pelas raízes (Huth *et al.*, 2009). Como já foi visto no início dessa sessão, o APSIM descreve a distribuição vertical do conteúdo de água do solo através de camadas (Probert *et al.*, 1998). E por isso, a água contida em cada camada torna-se progressivamente disponível, conforme a profundidade da frente de extração de água do solo (FE, mm) aumenta. A taxa de progresso da frente de exploração (∂FE) é calculada usando uma velocidade potencial da frente de extração (V_{FE}), que é dependente do conteúdo de água do solo na camada, para identificar o efeito de camadas de solo seco sobre a penetração das raízes.

$$\frac{\partial FE}{\partial t} = V_{FE} \omega_{EV} (SW_i) \quad (5)$$

em que, ω_{EV} é um fator de água no solo para o avanço da frente de extração e SW é o conteúdo volumétrico de água no solo.

Quando a frente de extração atinge uma camada “i”, a captação potencial de água na camada “i” (C_i) é descrita usando um simples modelo de decaimento de primeira ordem (Meinke *et al.*, 1993) para o teor de água acima do ponto de murcha (LL), de acordo com a equação abaixo. O parâmetro kl representa a fração de água disponível no solo que pode ser extraída por dia.

$$C_i = \frac{\partial SW_i}{\partial t} \partial x_i = kl_i (SW_i - LL_i) \partial x_i \quad (6)$$

A profundidade efetiva do sistema radicular, conforme observações de campo, foi de 30 cm para as simulações da região de Rio Largo-AL. E para a região de Arapiraca-AL 60 cm para as três primeiras épocas de semeio. A quarta época de semeadura (E4), foi considerada uma profundidade de 75 cm, devido a diminuição da chuva no ciclo da cultura que reduziu o conteúdo de água do solo, e também pelo fato da simulação no modelo para 60 cm não ter reproduzido bem as observações. Assim, inferiu-se esse valor, pois a frente de extração de água foi rebaixada, e por isso o sistema radicular aumentou pela busca por disponibilidade de água em camadas mais profundas. No entanto, experimentalmente essa hipótese não foi constatada, porque a profundidade do sistema radicular foi medida em uma época de semeadura que não sofreu estresse hídrico.

3.5.3 Transpiração

A transpiração potencial da planta (TR_0) é calculada pelo módulo “*micromet*” utilizando a formulação da equação de Penman-Montheith (Snow e Huth, 2004).

$$TR_0 = \left(\frac{1000(N - t_{init})}{\lambda \rho_{água}} \right) \left(\frac{\varepsilon \Delta R + \rho_{ar} \lambda D G_a}{\varepsilon + \frac{G_a}{G_c} + 1} \right) \quad (7)$$

em que, TR_0 é a transpiração potencial (mm); ε é a declividade da curva de saturação de vapor; ρ_{ar} é a densidade do ar (Kg m^{-3}); λ é o calor latente de vaporização (J kg^{-1}); D é o déficit de pressão de vapor específico (Kg Kg^{-1}); G_a é a condutância aerodinâmica (m s^{-1}); ΔR é a energia disponível para a evapotranspiração (W m^{-2}); N é o fotoperíodo (s); G_c condutância do dossel (m s^{-1}) e t_{init} é a duração da evaporação referente a precipitação interceptada (s).

O APSIM requer o processo de captação de água do solo pela planta (C) descrito no tópico anterior (equação 6), juntamente a TR_0 (Equação 7) para concluir a transpiração real da cultura (TR), que é então, definida para ser igual ao mínimo entre o abastecimento de água (C) e a demanda (TR_0).

$$TR = \min(TR_0, \sum C) \quad (8)$$

Se a C for maior do que TR_0 , a captação de água em cada camada é distribuída para baixo proporcionalmente a demanda para abastecimento. A proporção de transpiração potencial (TR_0) para a transpiração real (TR) é utilizada para quantificar o fator de estresse hídrico diário para o crescimento da planta (ω_g), em que o valor de 1 significa sem estresse e 0 significa estresse absoluto.

3.5.4 Movimento de água no solo

O balanço de água estratificado em camadas considera que, quando o conteúdo de água do solo está entre a capacidade de campo (DUL) e a saturação (SAT), uma fração de água é drenada para a camada seguinte (ΔSW_i), de acordo com a equação (9), que ajusta o fluxo pelo $SWCON$, que é um parâmetro de drenagem que indica a proporção de água acima de DUL que drena a cada dia na simulação. O valor de $SWCON$ utilizado foi de 0,2 para Rio

Largo-AL e para Arapiraca-AL 0,6 obtido pelo método das tentativas e erros, sendo este o valor que ofereceu um melhor ajuste entre resultados do modelo e os valores de conteúdo de água do solo observados pelo TDR. Portanto, para as condições de solo saturado, ou seja, com o conteúdo de água do solo (SW) acima de DUL, temos:

$$\Delta SW_{i+1} = SWCON_i (SW_i - DUL_i); \quad \text{para uma camada } i, \text{ com } SW_i > DUL_i \quad (9)$$

Para condições de solo não saturado ($SW_i < DUL_i$) o movimento de água irá depender do gradiente sob o teor de água entre as camadas, e da difusividade hidráulica (D), que é uma função do conteúdo médio de água entre duas camadas. O fluxo de água (q) entre camadas cessa a um gradiente de água limitante (*gravity_gradient*). Com isso, o fluxo de água no solo em condições não saturadas é descrito pelas equações (10) e (11).

$$D(SW) = ae^{b(SW-LL15)} \quad (10)$$

$$q = D(SW) \frac{\partial SW}{\partial x} \quad (11)$$

em que, a e b são, respectivamente, a constante de difusividade (*diffus_const*) e o declive de difusividade (*diffus_slope*) e $\partial SW/\partial x$ é o gradiente de água no solo em umidade volumétrica.

3.6 Fenologia da cultura

O módulo de milho do APSIM possui 11 estádios fenológicos e 9 fases (tempo entre os estádios). Os estádios fenológicos são determinados pelos graus-dia (GD), com exceção da semeadura, e também da germinação que é dirigida pela umidade do solo. Os valores dos graus-dia acumulados (GDA) são usados para determinar a duração de cada estádio. Os valores dos GDA são menores quando a planta está sob estresse de água ou nitrogênio. Os GDA entre a semeadura e germinação é dependente dos níveis de água no solo. Os GDA entre a germinação e emergência inclui um efeito sobre a profundidade de semeadura. A duração entre a emergência e o aparecimento da folha bandeira é determinado pelo número total de folhas destinadas a aparecer na planta, e a taxa na qual as folhas aparecem, que também é determinada pela temperatura do ar.

O GDA é calculado a partir da função linear da temperatura do ar, usando as máximas e mínimas temperaturas diárias. O GDA é derivado do acúmulo de GD após a emergência.

$$\text{GDA} = 0, \quad \text{para } T < T_b \text{ ou } T > T_m \quad (12)$$

$$\text{GDA} = T - T_b, \quad \text{para } T_b < T < T_{opt} \quad (13)$$

$$\text{GDA} = (T_{opt} - T_b) \left[\frac{1 - (T - T_{opt})}{(T_m - T_{opt})} \right], \quad \text{para } T_{opt} < T < T_m \quad (14)$$

em que, T_b é a temperatura base para o crescimento da folha (°C); T_{opt} é a temperatura ótima para o crescimento da folha (°C) e T_m é a temperatura máxima do ar para o crescimento da folha (°C).

Para minimizar o erro associado à variação diurna da temperatura do ar, é utilizado uma média de temperatura do ar a cada 3 horas para ser utilizada nas equações descritas acima. As médias de temperatura do ar a cada 3 horas são derivadas a partir das temperaturas do ar máximas e mínimas, conforme descrito por Jones & Kiniry (1986).

3.7 Desenvolvimento do dossel e índice de área foliar

O desenvolvimento do dossel é calculado de acordo com Hammer *et al.* (2010), considerando a planta inteira, através de uma relação entre a área foliar total da planta (TPLA) e os GDA.

$$\text{TPLA} = \frac{\text{TPLA}_{m\acute{a}x}}{\left\{ 1 + e^{[-\alpha(\text{GDA} - \beta)]} \right\}} \quad (15)$$

em que, $\text{TPLA}_{m\acute{a}x}$ é o valor máximo de TPLA; GDA é calculado conforme descrito no tópico anterior; e α , β são coeficientes de ajuste.

A área foliar de folhas verdes por planta (PLA) é determinada como a diferença entre a área foliar total produzida por planta (TPLA) e a área foliar senescida por planta (SPLA), utilizando procedimento descrito por Hammer & Muchow (1994).

$$\text{PLA} = \text{TPLA} - \text{SPLA} \quad (16)$$

$$\text{SPLA} = \frac{\text{TPLA}_{m\acute{a}x}}{\left\{ 1 + e^{[-\tau(\text{GDA} - \varepsilon)]} \right\}} \quad (17)$$

em que, ε e τ são coeficientes de ajuste.

Hammer & Muchow (1994) relataram que os valores $\alpha = 0,018$ e $\beta = 390$ simulou TPLA satisfatoriamente para uma ampla gama de cultivares. Carberry *et al.* (1993) encontraram valor de $\tau = 0,0071$, e uma relação entre ε e o número total de folhas por planta (TLN) de $\varepsilon = 81,5 * TLN - 321$. Eles descobriram que τ diferiu significativamente entre as cultivares, mas que essa diferença teve pouco efeito sobre a previsão da senescência foliar. Por fim, o Índice de Área Foliar (IAF) é calculado de acordo com Jones & Kiniry (1986), por um produto entre a área foliar de folhas verdes com a densidade de plantio (D).

$$IAF = (PLA) D 10^4 \quad (18)$$

3.8 Acúmulo e partição de biomassa

O acúmulo de biomassa no modelo é calculado em um intervalo de tempo diário, onde são realizadas duas estimativas a cada dia, a primeira limitada pela disponibilidade de água para a transpiração (Equação 19) e a segunda limitada pela energia radiante (Equação 20). A diferença entre essas duas estimativas representa a produção de biomassa real (BM) para cada dia.

$$BM_T = SW_{\text{supply}} TE \quad (19)$$

em que, SW_{supply} é o conteúdo total de água no solo (mm), TE é a eficiência de transpiração derivada do coeficiente de eficiência da transpiração ($TRB = 0.009 \text{ kPa kg}^{-1} \text{ m}^{-3}$) e do déficit de pressão de vapor (dpv, kPa) estimados pela temperatura do ar.

$$BM_{\text{pot}} = H_g EUR (1 - \exp^{-k * IAF}) \quad (20)$$

em que, H_g é a irradiação solar (MJ m^{-2}), EUR é a eficiência no uso da radiação que é de $1,6 \text{ g MJ}^{-1}$ (H_g) da emergência ao início do enchimento de grãos, e depois diminui para $1,4 \text{ g MJ}^{-1}$ a partir do início do enchimento de grãos, representando os efeitos da senescência foliar e redução da taxa fotossintética (Muchow *et al.*, 1990). A radiação interceptada é calculada a partir do índice de área foliar e um coeficiente de extinção de luz ($k = 0.53$).

A produção diária de biomassa é dividida para as partes da planta em diferentes proporções, dependendo do estágio de colheita. Até o final da fase juvenil a razão de biomassa destinada a parte aérea é mantida em 1,0 e depois diminui para um valor de 0,087 no florescimento. Entre a emergência e o aparecimento da folha bandeira, a proporção de biomassa produzida que é particionado para a folha aumenta exponencialmente com o aparecimento das folhas. Entre a iniciação floral e aparecimento da folha bandeira, a biomassa

remanescente após a alocação para folha, é então alocada entre o caule e a espiga numa taxa de 1:0,30. Após as folhas estiverem totalmente expandidas, a biomassa é dividida entre caule e a espiga, apenas até o início de enchimento de grãos. A partir do enchimento de grãos, o particionamento de biomassa é destinado apenas para a os grãos (APSIM, 2015a).

3.9 Análise de dados

Para avaliar o desempenho das estimativas foram realizadas as seguintes análises estatísticas: Erro percentual, Raíz quadrada do erro médio, Raíz quadrada do erro médio relativo e Eficiência da modelagem.

3.9.1 Erro Percentual (ERRO)

O erro percentual (ERRO) foi utilizado para indicar subestimativa (desvio negativo) e superestimativa (desvio positivo), entre os valores simulados e observados (Tojo Soler, 2004). O ERRO é calculado por:

$$ERRO = \frac{(S_i - M_i)}{M_i} 100 \quad (21)$$

3.9.2 Raíz Quadrada do Erro Médio (RMSE)

A Raíz Quadrada do Erro Médio (RMSE) é utilizada para mensurar a performance geral dos modelos e sintetiza a diferença média entre os valores observados e estimados. A unidade da RMSE é a mesma utilizada pelas variáveis observadas e simuladas. O modelo é melhor ajustado quando a RMSE se aproxima de zero (Loague & Green, 1991).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2} \quad (22)$$

3.9.3 Eficiência de Modelagem (EF)

A Eficiência de modelagem ($-\infty$ a 1), também denominada de Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) é uma medida adimensional, que foi desenvolvida para testar a eficiência de modelos hidrológicos, no entanto, é amplamente utilizada para testar modelos de culturas agrícolas (Yang *et al.*, 2014a). A eficiência da modelagem igual a um (EF = 1) indica uma combinação perfeita entre a saída do modelo e os dados observados. A eficiência da modelagem menor que um (EF < 1) é uma condição

fundamental para qualquer simulação realista. A eficiência da modelagem menor que zero ($EF < 0$) se o resultado do modelo for pior do que o resultado utilizando simplesmente a média observada (\bar{M}_i) para substituir os valores simulados (S_i). A eficiência da modelagem maior ou igual a zero ($EF \geq 0$) é uma condição fundamental para concluir aproximação entre os dados estimados e observados.

$$EF = 1 - \frac{\sum (S_i - M_i)^2}{\sum (M_i - \bar{M}_i)^2} \quad (23)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

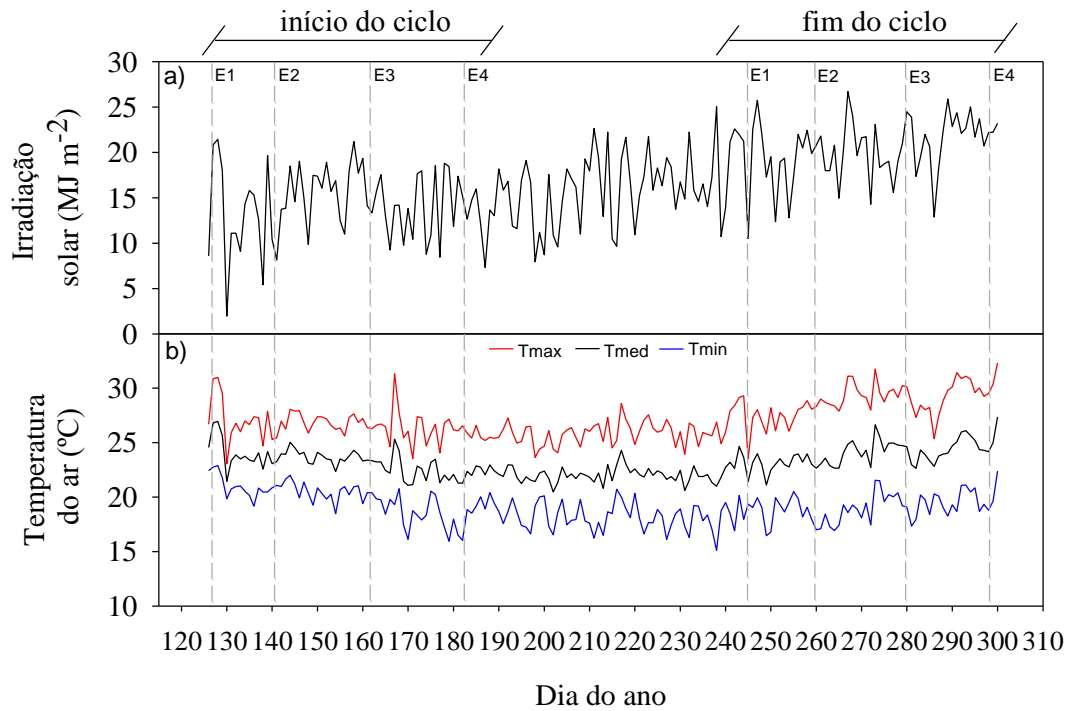
4.1 Condições meteorológicas durante os ciclos da cultura

A região de Arapiraca-AL teve valores máximos diários da irradiação solar (H_g , MJ m⁻²) entre as épocas de semeadura variando entre 16,7 MJ m⁻² (E3) e 26,7 MJ m⁻² (E4). As demais épocas (E1 e E2) tiveram valores máximos de H_g igual a 25,0 MJ m⁻² e 25,7 MJ m⁻², respectivamente. Os valores mínimos diários de H_g variaram entre 1,96 MJ m⁻² (E1) e 7,3 MJ m⁻² (E2, E3 e E4) (Figura 4a). A H_g acumulada durante os ciclos da cultura ($H_{g_{acum}}$) variou entre 1808,9 MJ m⁻² (E1) e 2095,3 MJ m⁻² (E4), onde as épocas E2 e E3 atingiram valores intermediários iguais a 1925,6 MJ m⁻² e 1987,4 MJ m⁻². A temperatura do ar (Figura 4b) na E1 e E2 variou entre 15,1°C e 31,3°C, com médias de 22,7°C e 22,6°C, e graus-dia acumulados de 1748,0 e 1765,8 GDA, respectivamente. Na E3 e E4 a temperatura do ar teve variação entre 15,1°C e 31,7°C, com médias de 22,6°C e 22,9°C, que resultaram em 1745,5 e 1749,2 GDA, respectivamente.

Devido a data de semeadura mais tardia, o ciclo E4 teve a menor precipitação acumulada (P_{acum}) dentre as demais épocas, com 344,6 mm, abaixo do mínimo recomendado por Dorenboos & Kassam (1979) para a cultura do milho que é de 400 mm no ciclo. Isso ocorreu devido à má distribuição anual da precipitação na região (média climatológica anual de 870 mm), em que, cerca de 70% do total de chuva ocorre entre os meses de abril a agosto, prejudicando as épocas de semeadura mais tardias devido a menor disponibilidade pluvial. O ciclo E1 por ter sido semeado no início do período chuvoso da região, teve maior disponibilidade hídrica com P_{acum} igual a 677,6 mm. Seguido das épocas E2 e E3, que tiveram P_{acum} igual 518,9 e 404,6 mm, respectivamente.

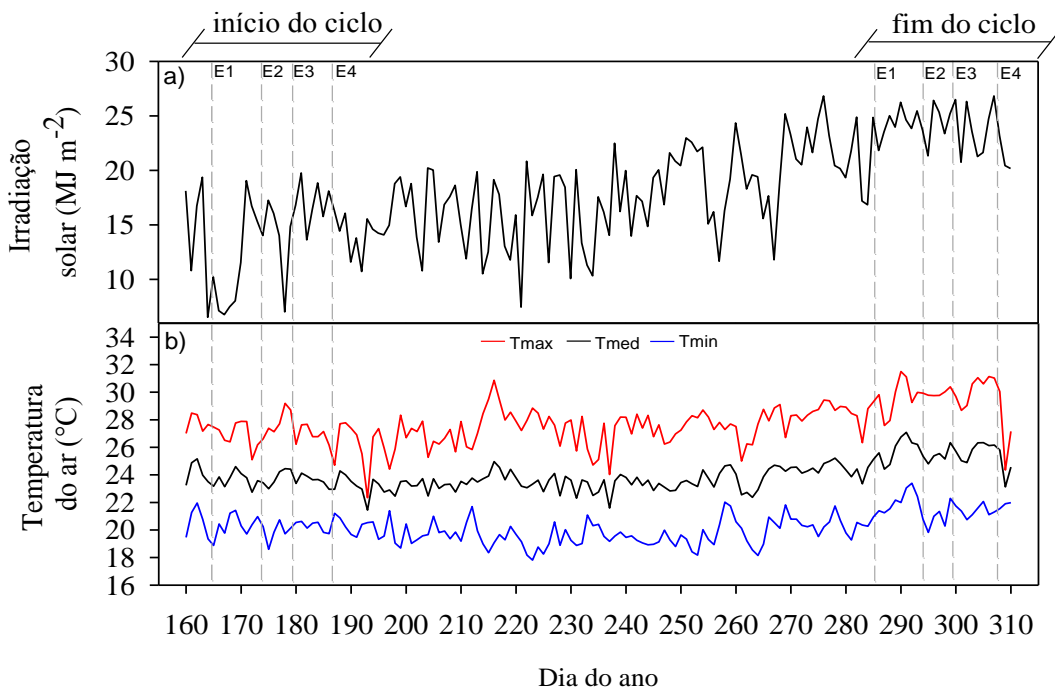
A região de Rio Largo-AL, teve máximos valores diários de H_g (Figura 5a) entre as quatro épocas de semeadura, variando de 24,9 MJ m⁻² (E1 e E3) a 29,9 MJ m⁻² (E2), e a H_g máxima diária na E4 foi igual a 25,7 MJ m⁻². O valor mínimo diário de H_g para todas as épocas foi de 5,6 MJ m⁻². A $H_{g_{acum}}$ foi maior nas épocas mais tardias (E3 e E4) com valores respectivos de 2262,6 e 2242,2 MJ m⁻². Isso ocorreu, devido aos ciclos E3 e E4 se estenderem até meados do mês de outubro, em que na região a cultura já dispõe de fotoperíodos maiores, resultando em dias mais longos. E também, a partir de setembro já se inicia o período seco (não chuvoso) da região, e por consequência, uma menor cobertura de nuvens e maior disponibilidade de H_g são observados. Na E1, $H_{g_{acum}}$ teve valor de 2070,6 MJ m⁻² e E2 igual a 2031,4 MJ m⁻².

Figura 4 - Irradiação solar global (H_g) [a] e temperaturas máximas (T_{max}), médias (T_{med}) e mínimas (T_{min}) [b] durante as quatro épocas de semeadura para a região de Arapiraca-AL, ano 2008.



Fonte: Autor (2015)

Figura 5 - Irradiação solar global (H_g) (a) e temperaturas máximas (T_{max}), médias (T_{med}) e mínimas (T_{min}) [b] durante as quatro épocas de semeadura para a região de Rio Largo-AL, ano 2011.



Fonte: Autor (2015)

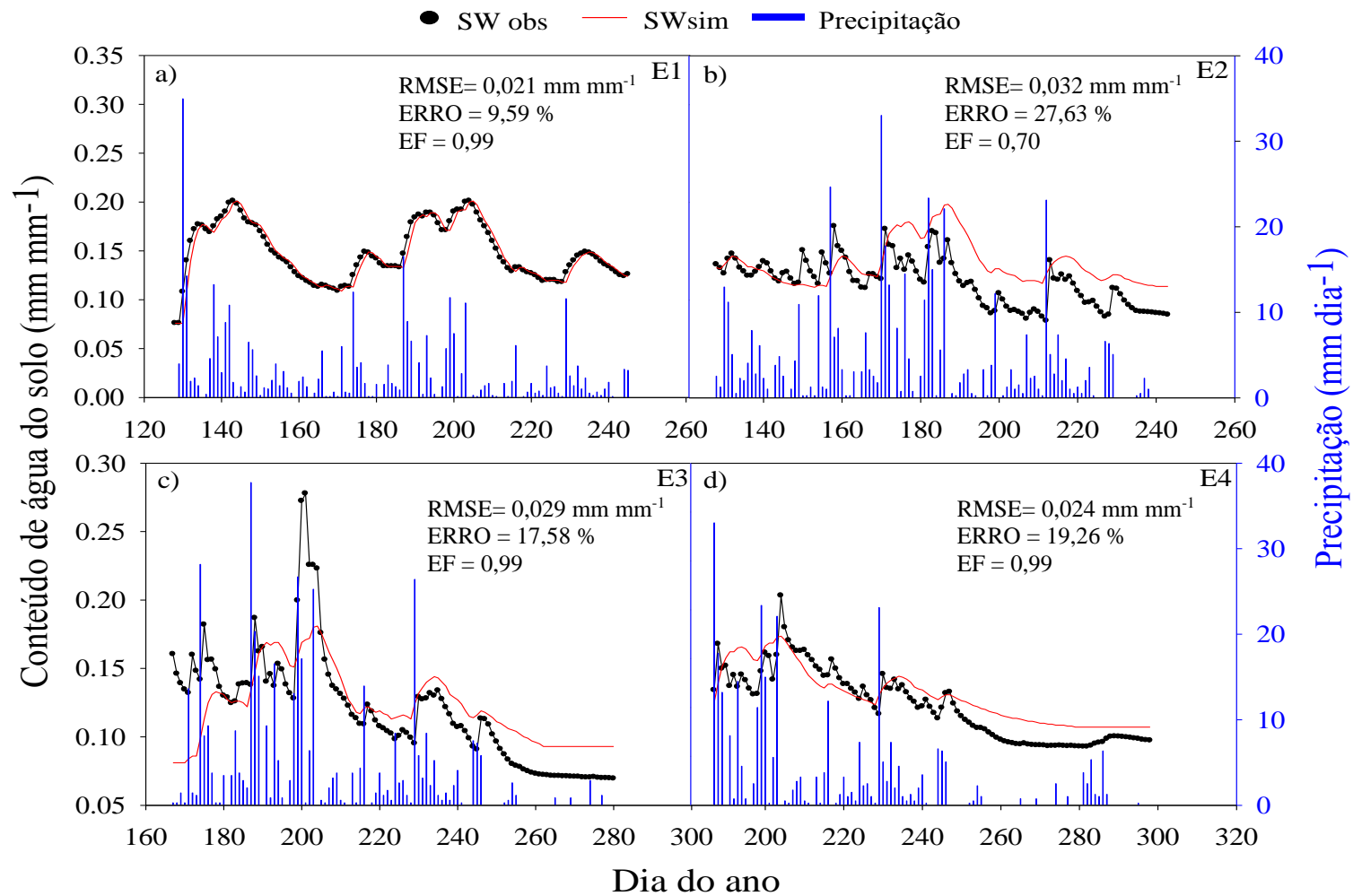
A temperatura do ar (Figura 5b) na E1 e E2 variou entre 17,81 e 30,8°C, com média de 23,6°C, resultando em 1889,7 e 1833,3 GDA, respectivamente. Nas épocas E3 e E4, a temperatura do ar apresentou variação de 17,81 a 31,5°C, com uma média de 24,0°C, que obtiveram, respectivamente, 2005,9 e 1967,7 GDA. A P_{acum} variou de maneira decrescente ao longo das quatro épocas de semeadura, devido a região de Rio Largo-AL também apresentar maior parte da precipitação anual concentrada entre os meses de abril a agosto. Com isso, os valores de P_{acum} variaram entre 732,2 mm (E1) a 634,2 mm (E4), e os valores intermediários foram 655,3 mm (E2) e 642,6 mm (E3).

Elementos meteorológicos como a irradiação solar e temperatura do ar interagem entre si, quando se diz respeito a quantidade de radiação interceptada pela cultura. Do ponto de vista que a temperatura afeta no desenvolvimento foliar, que por sua vez irá reduzir a área das folhas, e alterar a fração da radiação interceptada e a eficiência de interceptação. Wilson *et al.* (1995) destaca a importância da irradiação solar e temperatura do ar na determinação do potencial produtivo de milho em climas diversos, e observou que em climas tropicais o potencial produtivo é limitado pelo crescimento de curta duração, em função de altas temperaturas que aceleram o ritmo de desenvolvimento da cultura. No presente estudo, não foram observadas diferenças significativas com relação a duração dos ciclos de desenvolvimento da cultura devido a temperatura do ar. Para Arapiraca-AL, a duração do ciclo variou entre 116 dias (E4) e 120 dias (E2), e para a região de Rio Largo-AL, a variação foi de 116 dias (E2) a 125 dias (E3). Isso acontece porque nas regiões estudadas a cultura não se submete a amplitudes térmicas com diferença significativa entre as épocas de semeadura. Salienta-se que em ambos os locais estudados, a temperatura média do ar não atingiu valores que pudessem comprometer o desenvolvimento e maturação da cultura, se mantendo durante todo período acima de 20°C. De acordo com Doorenbos & Kassam (1979), temperaturas abaixo 20°C tende a estender o período para atingir o amadurecimento em aproximadamente 10 a 20 dias para cada 0,5 °C de diminuição da temperatura, dependendo da variedade.

4.2 Balanço de água no solo

O modelo simulou a dinâmica de água no solo, para a região de Arapiraca-AL com RMSE variando de 0,021 mm mm⁻¹ (E1) a 0,032 mm mm⁻¹ (E3) entre as diferentes épocas de semeadura (Figura 6). A simulação inicial (E1) mostra um adequado ajuste com os dados observados (Figura 6a), indicando um resultado satisfatório referente a todos os parâmetros utilizados para obter os componentes do balanço de água no solo (mencionados no tópico 3).

Figura 6 - Conteúdo de água do solo (SW) na profundidade de 0 a 60 cm simulados (SW_{sim}) e observados (SW_{obs}), para as quatro épocas de semeadura do milho a) E1, b) E2, c) E3 e d) E4 na região de Arapiraca, AL.

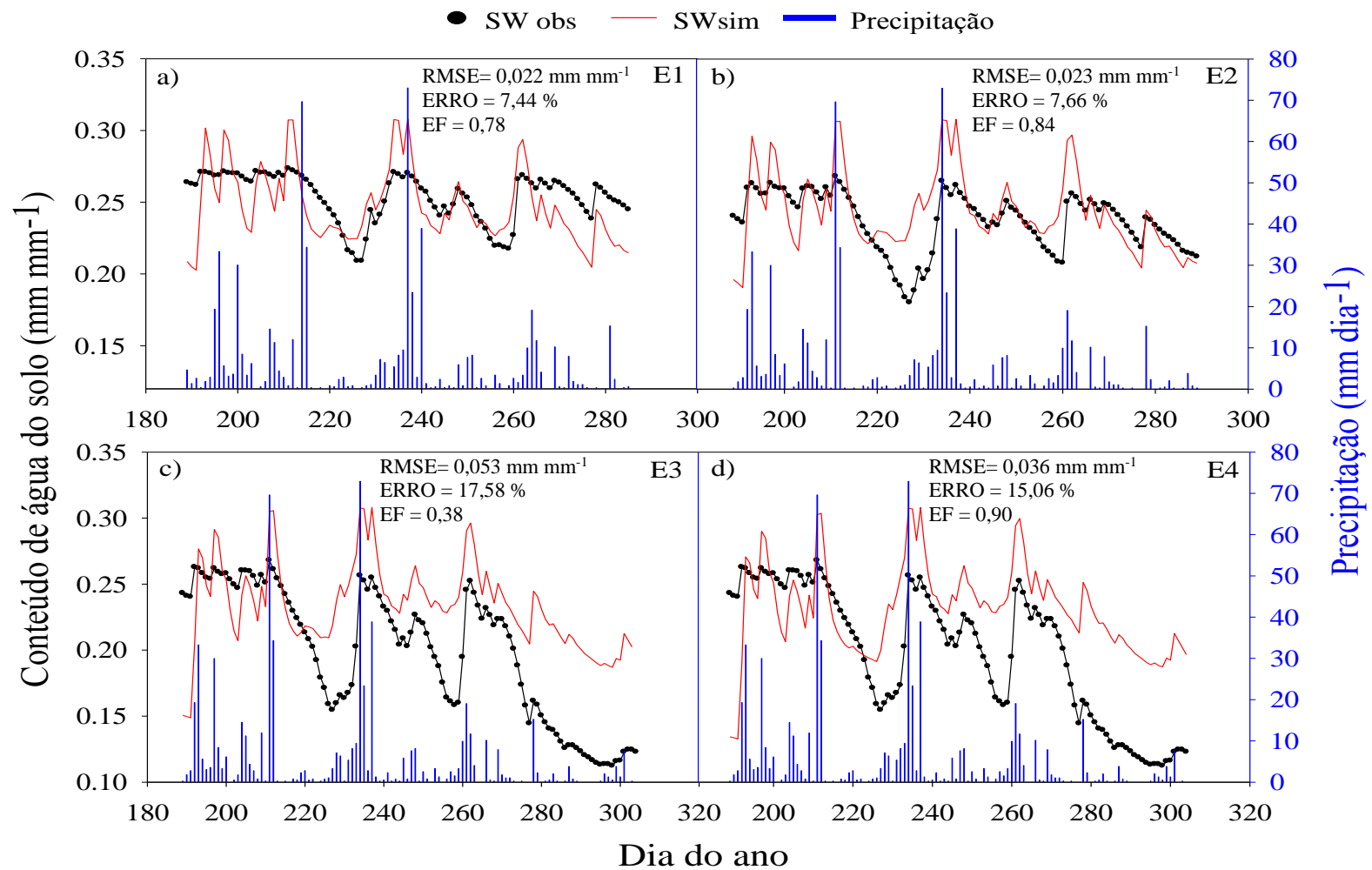


RMSE: Raiz quadrada do erro médio (mm mm⁻¹); EF: Eficiência da modelagem; ERRO: Erro percentual (%).
 Fonte: Autor (2015).

Essa parametrização refletiu também nos resultados das demais épocas de semeadura (E2, E3 e E4), em que os valores observados e simulados apresentaram tendências semelhantes, apesar de magnitudes distintas, com erro percentual variando na ordem de 9,5 a 27,6 %, evidenciando que o modelo reproduziu o processo real da dinâmica de água no solo satisfatoriamente. No entanto, Archontoulis *et al.* (2014) não considera esse tipo de resultado surpreendente, tendo em vista que o APSIM requer dados do conteúdo de água na capacidade de campo (DUL) e ponto de murcha (LL), ambos determinados em condições experimentais. Por outro lado, as simulações para a região de Rio Largo-AL, que possui um tipo de solo com características físicas diferentes (com uma camada adensada em ~ 30 cm de profundidade), mostraram que o modelo mesmo utilizando parâmetros físico-hídricos reais, não reproduziu adequadamente determinados processos da dinâmica de água do solo. Processos estes que certamente estejam relacionados ao parâmetro de drenagem utilizados pelo APSIM. Essa hipótese é levantada, porque foi observado que em dias ou períodos com grande precipitação acumulada, o APSIM superestimou as observações de SW (Figura 7). Em períodos com baixo acumulado de chuva, o modelo se aproximou das observações. Na prática, o APSIM identificou a camada adensada (numa profundidade em torno de 30 cm) existente no solo da região, que diminuiu a drenagem da água, que foi subestimada para esse caso particular no modelo. Por esse motivo, ajustou-se o parâmetro de condutividade de água do solo (SWCON, d^{-1}) de 0,2 (Probert *et al.*, 1998) para 0,6 pelo método das tentativas e erros, representando o valor de melhor ajuste entre os dados de SW_{obs} e SW_{sim} . O SWCON representa a água acima de DUL que é drenada a cada dia. Apesar da modificação no parâmetro de drenagem, as estimativas de SW para Rio Largo-AL resultaram em erros percentuais variando da ordem de 7,4 a 17,5 %, com RMSE de $0,033 \text{ mm mm}^{-1}$.

Resultados semelhantes sobre a dinâmica de água no solo foram encontrados por Archontoulis *et al.* (2014) com o modelo APSIM para a cultura do milho na região Centro-Oeste dos EUA, com RMSE em torno de $0,03 \text{ mm mm}^{-1}$. Porém, no presente estudo foi possível obter resultados mais satisfatórios para a região de Arapiraca-AL (Figura 6a-d). Uma razoável performance do APSIM na estimativa de SW foi encontrada na simulação da cultura do algodão no Norte da China (Yang *et al.*, 2014b), trigo no oeste da Austrália (Asseng *et al.*, 1998) e canola no sul da Austrália (Zeke *et al.*, 2014). Nesses trabalhos observaram-se boas previsões de SW (com coeficientes de determinação (r^2) acima de 0,92), utilizando o módulo *SoilWat* (Probert *et al.*, 1998).

Figura 7 - Conteúdo de água do solo (SW) na profundidade de 0 a 30 cm simulados (SW_{sim}) e observados (SW_{obs}), para as quatro épocas de semeadura do milho a) E1, b) E2, c) E3 e d) E4 na região de Rio Largo, AL.



RMSE: Raiz quadrada do erro médio (mm mm⁻¹); EF: Eficiência da modelagem; ERRO: Erro percentual (%).
 Fonte: Autor (2015)

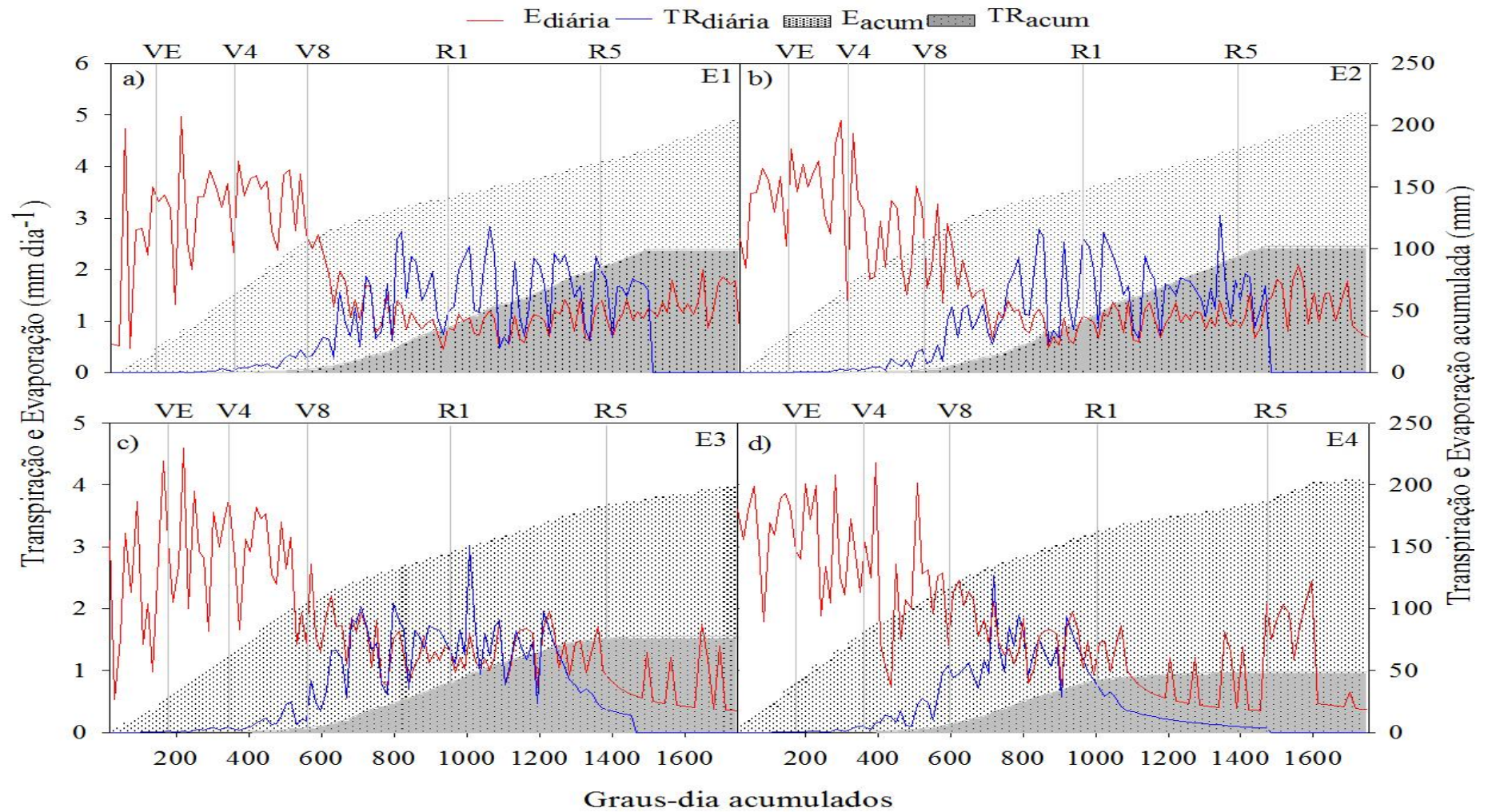
As simulações para SW realizadas nesse estudo confirmam a eficiência do APSIM no cálculo dessa variável, com desempenho dentro da realidade de outras pesquisas semelhantes (Mohanty *et al.*, 2012; Asseng *et al.*, 1998), e em certas condições (Figura 6a) com performance superior. Isso é respaldo de uma correta calibração, conferindo boa confiança do modelo na estimativa das variáveis do balanço de água no solo.

4.3 Transpiração e evaporação simuladas no APSIM

Devido a calibração da dinâmica da água no solo no modelo APSIM foi possível obter as componentes: transpiração da cultura (TR) e evaporação da água do solo (E) referentes a cada época de semeadura simuladas pelo modelo. A E é um elemento importante no balanço de água em sistemas agrícolas, embora não seja considerada como um fator diretamente relacionado com a produção das culturas, mas pode influenciar indiretamente a disponibilidade de água para a TR, que está diretamente associado à produção das culturas (Singh *et al.*, 2014). Para as simulações de Arapiraca-AL, as duas primeiras épocas (Figura 8a e 8b) tiveram evaporação máxima diária ($E_{m\acute{a}x}$) de 4,9 mm e evaporação acumulada durante o ciclo (E_{acum}) de 206 mm e 212,7 mm, respectivamente. A terceira época (Figura 8c) obteve $E_{m\acute{a}x}$ de 4,5 mm e E_{acum} de 200 mm. Na época mais tardia (Figura 8d) a $E_{m\acute{a}x}$ foi de 4,3 mm, e E_{acum} igual a 206 mm. Para a transpiração da cultura, os valores da transpiração máxima ($TR_{m\acute{a}x}$) variou entre 2,5 mm (E1 e E4) e 3,0 mm (E2 e E3) com TR_{acum} entre 48,0 mm (E4) e 102,0 mm (E2). As simulações para Rio Largo-AL (Figura 9) mostraram uma $E_{m\acute{a}x}$ variando entre 4,5 mm (E4) e 5,0 mm (E1, E2, E3). Os valores de E_{acum} ficaram entre 182,6 mm (E2) e 200,7 mm (E4), e as demais épocas com 189,8 mm (E1) e 194,5 mm (E4). A transpiração da cultura teve valores de $TR_{m\acute{a}x}$ com variação entre 4,1 mm (E3) e 5,4 mm (E1) e valores de TR_{acum} variando de 124,0 mm (E1) a 194,5 mm (E4).

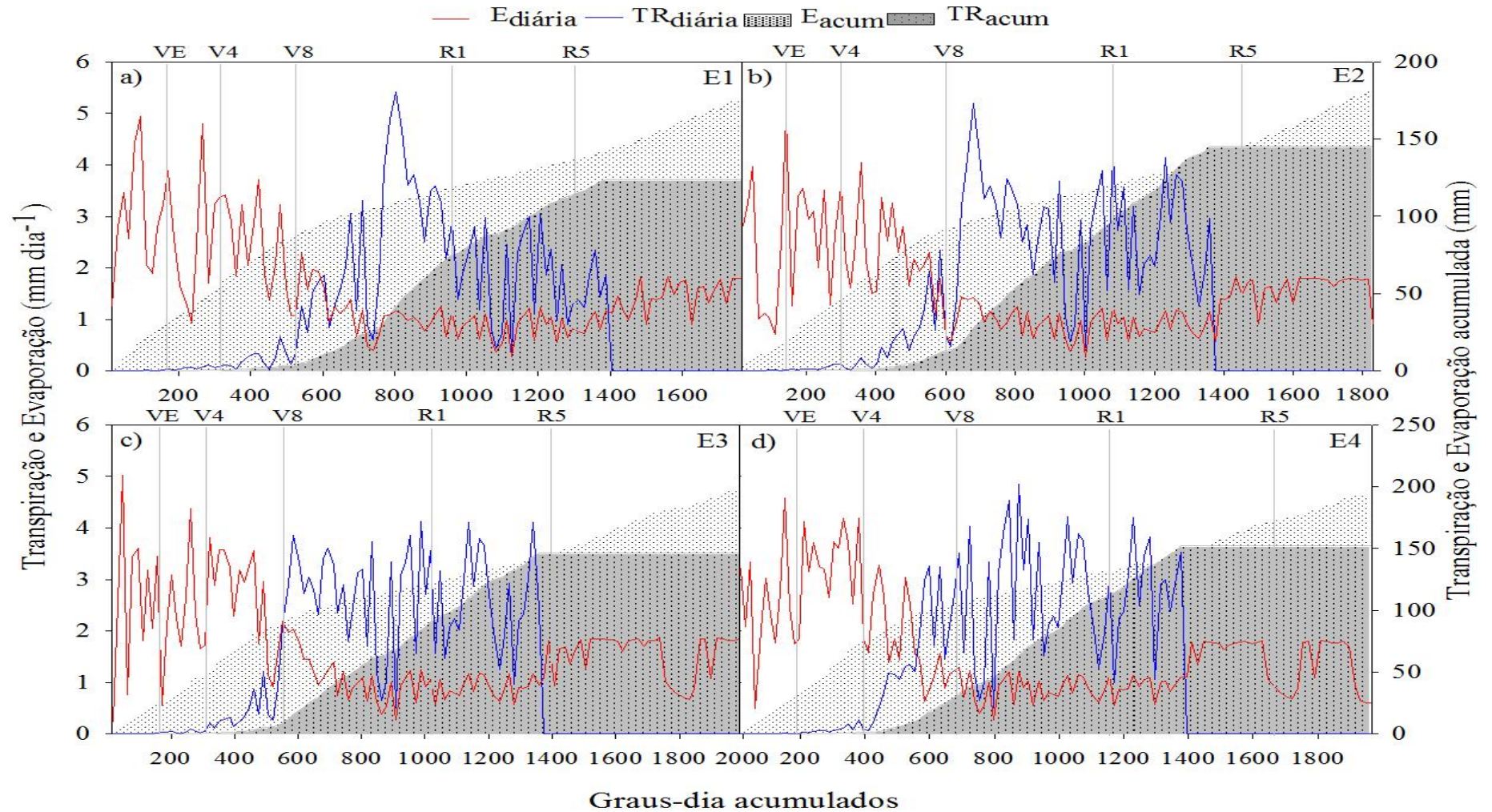
O incremento da transpiração da cultura foi diretamente proporcional ao crescimento/desenvolvimento do tecido foliar, em que, de maneira geral para as duas regiões estudadas (Figura 8 e 9) os valores de $TR_{m\acute{a}x}$ ocorreram entre os estádios fenológicos V8 e R5, na qual a cultura já tem a maior parte de suas folhas totalmente expandidas e atinge a maturação fisiológica. A redução da evaporação também se deu concomitantemente ao aparecimento de folhas, em que de maneira geral, dentre as simulações, pode-se observar depleção significativa de E a partir do estágio V4. A redução da transpiração foi proporcional à redução de folhas verdes, decorrente do processo de senescência da planta.

Figura 8 - Simulação no APSIM da transpiração (TR), evaporação (E), transpiração acumulada (TR_{acum}) e evaporação acumulada (E_{acum}) no ciclo da cultura, para as quatro épocas de semeadura, na região de Arapiraca-AL em função dos graus-dia acumulados (GDA).



Fonte: Autor (2015).

Figura 9 - Simulação no APSIM da transpiração (TR), evaporação (E), transpiração acumulada (TR_{acum}) e evaporação acumulada (E_{acum}) no ciclo da cultura, para as quatro épocas de semeadura, na região de Rio Largo-AL, em função dos graus-dia acumulados (GDA).



Fonte: Autor (2015)

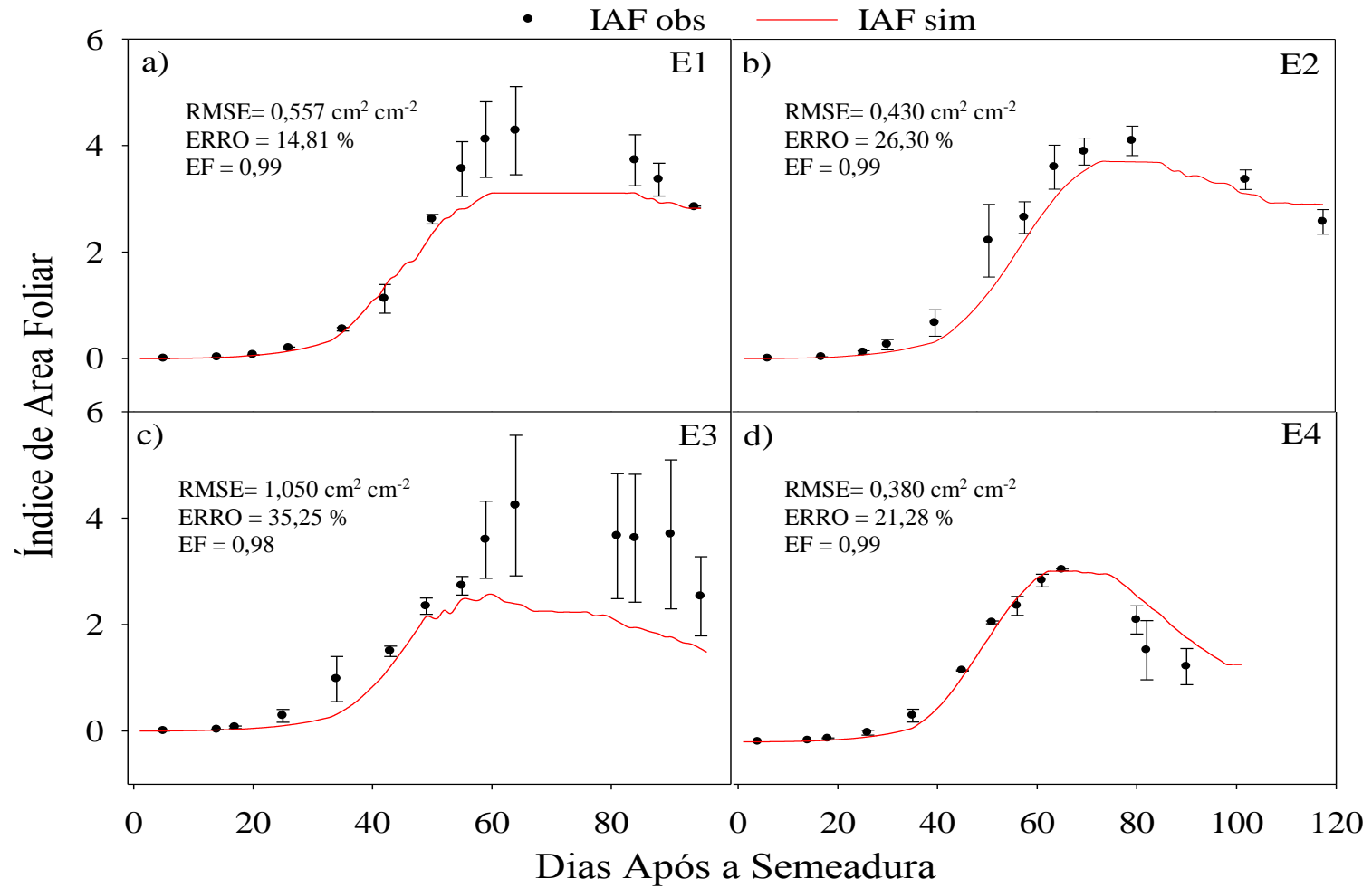
Do ponto de vista fisiológico da cultura, de acordo com Godoy *et al.* (2001), o aumento da transpiração pode ser ocasionado pela destruição da cutícula, aumento da permeabilidade da membrana das células da folha e pela inibição do fechamento dos estômatos. A diminuição da transpiração pode ser resultante do fechamento induzido dos estômatos por doenças, redução dos espaços do mesófilo pelas hifas ou hipertrofia das células do mesófilo, obstrução dos tecidos condutores e estômatos, desfolha e/ou murcha e seca precoce das folhas. No entanto, em nenhum dos experimentos, houve aparecimento descontrolado de pragas e doenças, que viesse a causar danos em grande escala ao tecido das folhas ou perda de produtividade. Com isso, a variação da transpiração da cultura se deu somente em função dos processos fisiológicos da planta que são considerados no modelo. Comparações da estimativa de E pelo APSIM foram feitas por outros pesquisadores (Singh *et al.*, 2014; Wei *et al.*, 2015), e no geral as simulações foram bem avaliadas.

4.4 Índice de área foliar

A prévia calibração do IAF foi importante para não haver equívocos nas estimativas de outros elementos dependentes das variáveis de crescimento da cultura (biomassa e rendimento de grãos). Por isso, alguns parâmetros foram ajustados para representar as condições reais de crescimento e obter melhores estimativas do IAF. O parâmetro associado com o envelhecimento das folhas (“*leaf_no_dead_slope*”) foi reduzido de 0,00035 para 0,0002, a fim de atingir melhor representação do decaimento da curva do IAF, decorrente do processo de senescência foliar, concordando com a metodologia adotada por Archontoulis *et al.* (2014). A variação do IAF (“*x_lai*”) foi ampliada de 0,1 a 4,0 para 0,1 a 6,0, porque esse limite superior (4,0) impediu a simulação de acompanhar as observações, tendo em vista que em condições experimentais o IAF máximo foi de 5,6 em Rio Largo-AL.

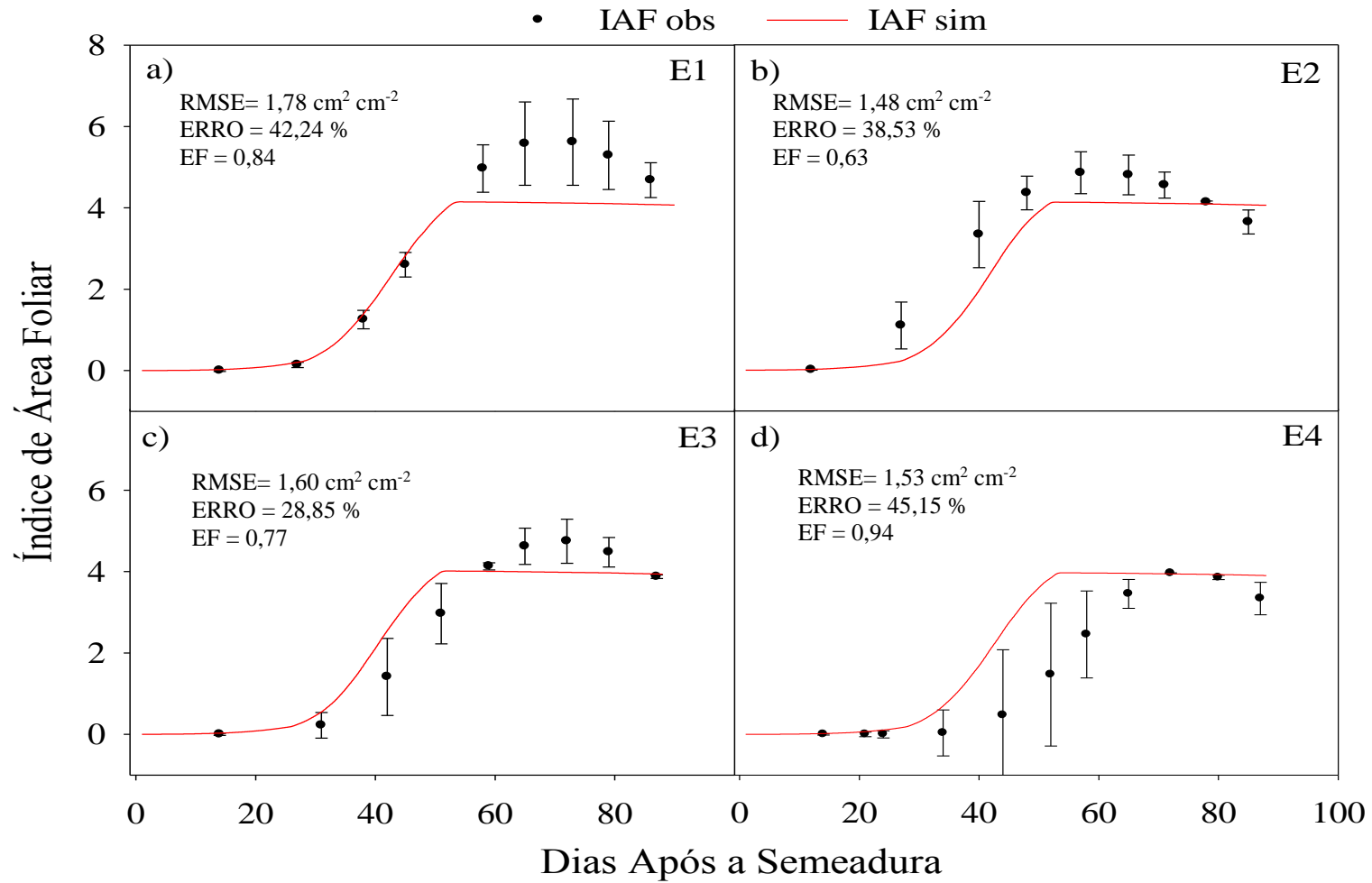
O modelo estimou o índice de área foliar (IAF) para a região de Arapiraca-AL com erro percentual (ERRO) médio entre as épocas de semeadura de 24,4 %, e RMSE igual a 0,60 cm² cm⁻² (Figura 10). As épocas E2 e E4 estimaram o IAF satisfatoriamente, em relação as demais, com RMSE variando de 0,380 a 0,430 cm² cm⁻² (Figura 11b,d). Nas E1 e E3 (Figura 10a,c) o modelo conseguiu reproduzir a curva do IAF durante todo período inicial de crescimento, até por volta dos 50 a 60 DAS com erro percentual abaixo de 20%. Os valores simulados E4 (Figura 10d) se mostraram mais ajustados as observações após a modificação na profundidade do sistema radicular de 60 para 75 cm, que representou uma redução de 26,3% no erro da estimativa.

Figura 10 - Índice de área foliar simulados (IAF_{sim}) e observados (IAF_{obs}) em função dos Dias após a semeadura (DAS) para a cultura do milho na região de Arapiraca, AL.



Fonte: Autor (2015).

Figura 11 - Índice de Área Foliar simulados (IAF_{sim}) e observados (IAF_{obs}) em função dos Dias após a sementeira (DAS) para a cultura do milho na região de Rio Largo, AL.



Fonte: Autor (2015).

Para a região de Rio Largo-AL (Figura 11) o APSIM simulou o IAF com ERRO variando de 28,8 a 38,5 % entre as épocas de semeadura E2 e E3, e as estimativas para a E3 e E4 resultaram em ERRO em torno de 40%. O RMSE foi de $1,59 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ e EF de 0,79 dentre as avaliações. A simulação E1 conseguiu reproduzir com baixos desvios os dados observados até aproximadamente 55 DAS. As simulações para E2 e E3 tiveram uma tendência semelhante, sendo que a E2 subestimou as observações durante toda a fase de crescimento (Figura 11b) e a E3 superestimou os dados observados durante esse período (Figura 11c). No entanto, ambas as simulações conseguiram reproduzir os valores iniciais e finais do IAF observado. A simulação para E4, apesar de concordar com as observações na fase inicial e final do ciclo, apresentou grandes desvios durante a fase de crescimento (Figura 11d).

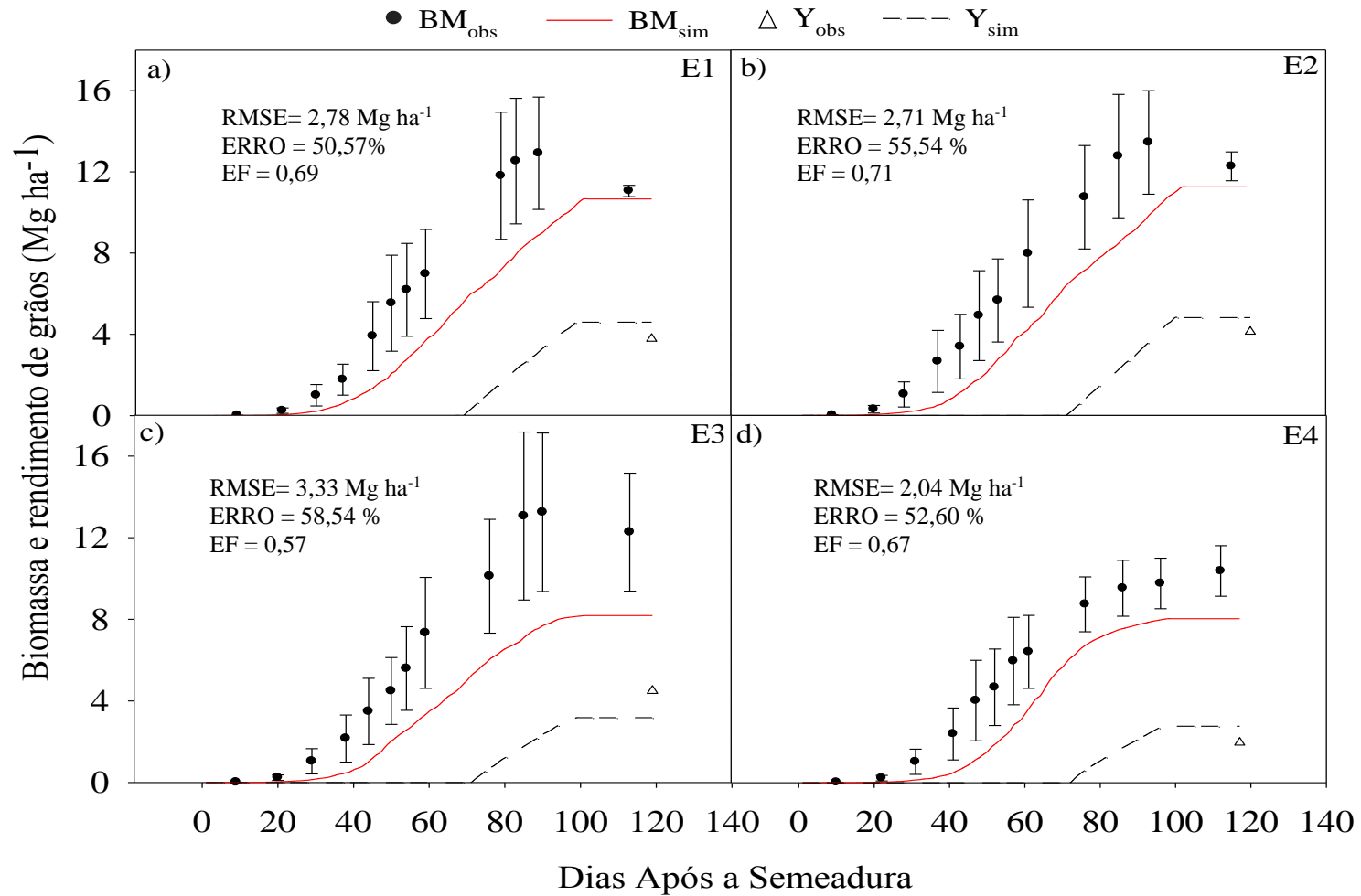
Estudos com a cultura do trigo em regiões da Austrália (Meinke *et al.*, 1997; Asseng *et al.*, 1998) consideraram baixa eficiência do APSIM-Wheat (Módulo de trigo) na previsão do IAF, apesar do bom desempenho do modelo na simulação de variáveis fenológicas e de produção (biomassa). No entanto, as previsões do IAF, para a cultura do milho nas regiões avaliadas nesse estudo, de um modo geral, foram razoáveis. Boa precisão foi obtida nas fases iniciais e finais de crescimento. Archontoulis *et al.* (2014) encontraram RMSE na estimativa do IAF com o APSIM-Maize, variando entre 0,44 e $0,56 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ e considerou a simulação satisfatória. É importante ressaltar que no presente estudo o APSIM gerou RMSE de até $0,38 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$. Assim, o desempenho razoável das estimativas do IAF não comprometeu a acurácia das simulações de produção de biomassa. Asseng, *et al.* (1998) consideraram surpreendente o fato de que, muitas vezes simulações do IAF com baixa acurácia não comprometam as previsões da biomassa, embora o IAF seja fundamental para a interceptação de luz e cálculo de fotossíntese no modelo. No entanto, a baixa influência dos valores simulados do IAF sobre a biomassa (em alguns casos) pode ser explicada pela maior importância de simulações com menor erro do IAF na fase inicial e final de crescimento e do enchimento de grãos. Uma menor relevância da estimativa do IAF é observada quando o solo está totalmente coberto (IAF máximo). Nesse caso, o aumento do IAF passa a ter baixo efeito sobre a interceptação de luz (Ritchie *et al.*, 1985; Asseng *et al.*, 1998), que observou-se na cultura do trigo. No presente estudo não notou-se independência entre o IAF e produção de biomassa, ou seja, os valores da biomassa se mostraram sensíveis às modificações realizadas na calibração do IAF.

4.5 Produção de Biomassa e Rendimento de grãos

A produção de biomassa (Figura 12 e 13) é dependente do coeficiente de extinção de luz (k ou “ $y_extinct_coef$ ”), que foi mantido o valor padrão do modelo de 0,53. No entanto, Ferreira Junior *et al.*, 2014 encontrou 0,62 obtido para a RFA em condições experimentais referente a variedade utilizada, que corresponde praticamente ao mesmo valor de 0,53 se considerar a irradiação solar (H_g). A eficiência no uso da radiação (EUR) foi 1,6 g MJ⁻¹ até o início do enchimento de grãos, após isso foi decrescida para 1,4 g MJ⁻¹ (Muchow *et al.*, 1990), devido a redução da taxa fotossintética, decorrente do processo de senescência das folhas. Os valores de EUR também foram mantidos os padrões do APSIM (Versão 7.6), porque estudos recentes realizados nos EUA mostraram que a EUR para a cultura do milho é de aproximadamente 1,67 g MJ⁻¹ H_g, ou seja, um valor condizente com os adotados pelo APSIM-Maize (Singer *et al.*, 2011; Archontoulis *et al.*, 2014). No entanto, a utilização desses valores, diferem de outros modelos de simulação do crescimento da cultura do milho, como é o caso do CERES-Maize (Jones & Kiniry, 1986), que em sua primeira versão considerou 5,0 g MJ⁻¹ RFA, mas que foi reduzido para 4,3 g MJ⁻¹ RFA em suas versões subsequentes (Kiniry *et al.*, 1997), que posteriormente foi utilizado pelo modelo Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004).

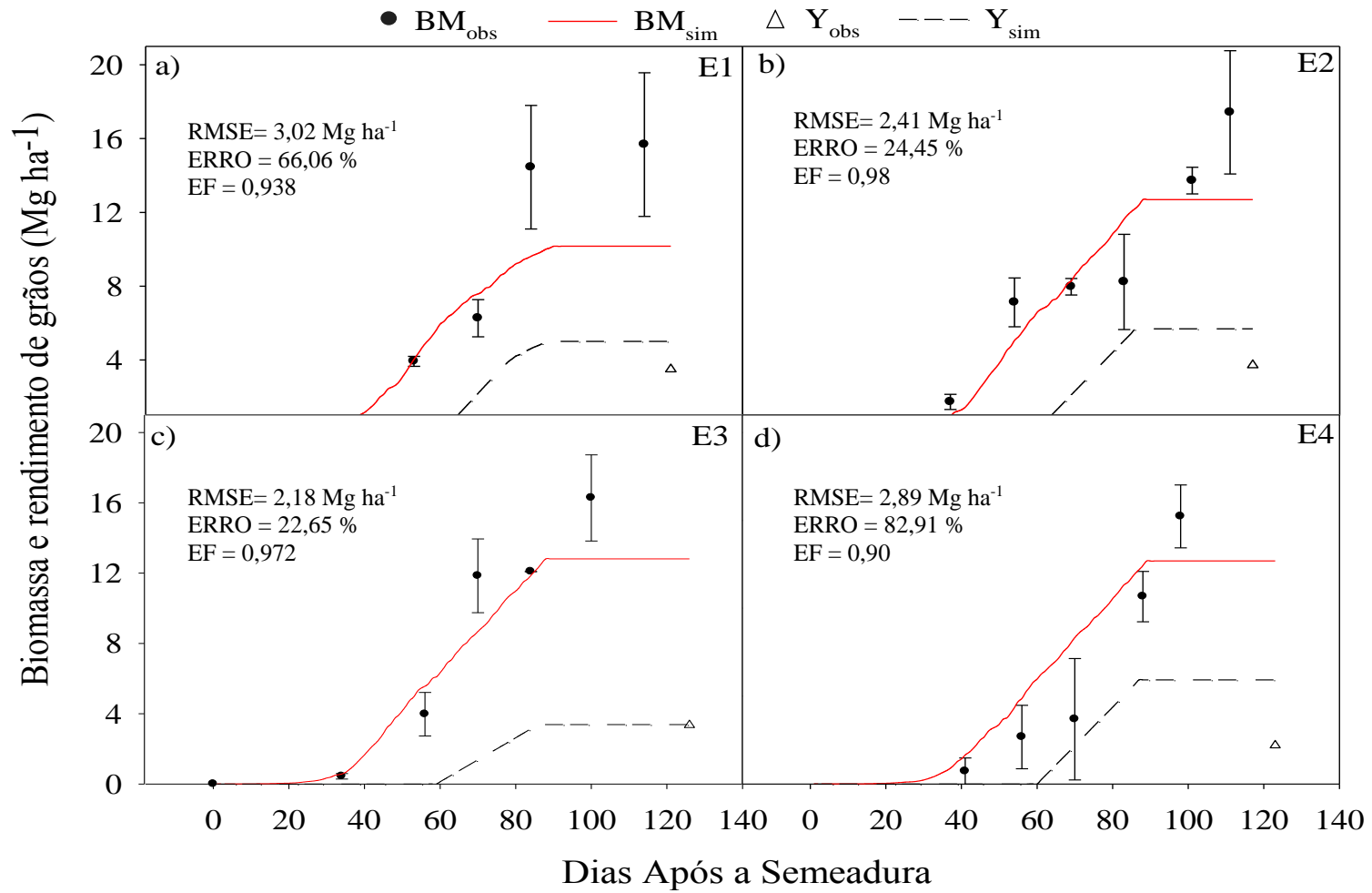
Para Arapiraca-AL (Figura 12), o APSIM estimou a biomassa observada (BM_{obs}), durante o período de crescimento, com erro de 54,3 % e uma diferença média entre os valores observados e simulados (RMSE) de 2,72 Mg ha⁻¹ com EF de 0,66. Apesar dos grandes desvios observados ao longo dos ciclos da cultura, o modelo estimou com baixos desvios a biomassa total (BT) para as duas primeiras épocas (Figura 12a e 12b) e rendimento de grãos (Y), que estão destacados na Tabela 6. A E1 teve uma produção de biomassa total observada (BT_{OBS}) de 11,05 Mg ha⁻¹ e produção de biomassa total simulada (BT_{SIM}) igual a 10,66 Mg ha⁻¹, resultando em ERRO de 3,5%. A E2 teve BT_{OBS} e BT_{SIM} de 12,26 Mg ha⁻¹ e 11,25 Mg ha⁻¹, respectivamente, e ERRO igual a 8,9 %. As duas últimas épocas (E3 e E4) tiveram, respectivamente, a BT_{OBS} de 12,26 Mg ha⁻¹ e 10,37 Mg ha⁻¹ e BT_{SIM} iguais a 8,17 Mg ha⁻¹ e 8,03 Mg ha⁻¹, que resultaram em subestimativas de 33,3 % e 34,5 %. O rendimento de grãos (Y) se aproximou das observações para as quatro épocas de semeaduras com ERRO variando entre 15,0 % (E2) e 41,3 % (E4). Na E2 o Y_{obs} foi de 4,18 Mg ha⁻¹ e Y_{sim} de 4,81 Mg ha⁻¹ e na E4 o Y_{obs} foi de 1,96 Mg ha⁻¹ e Y_{sim} de 2,77 Mg ha⁻¹. Nas épocas E1 e E3 o Y_{obs} foram de 3,77 e 4,49 Mg ha⁻¹ e o Y_{sim} de 4,59 e 3,17 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Figura 12 - Biomassa real (BM_{obs}) e simulado (BM_{sim}) e Rendimento de grãos real (Y_{obs}) e simulado (Y_{sim}) em função dos Dias Após a Semeadura (DAS) para a cultura do milho na região de Arapiraca, AL.



Fonte: Autor (2015).

Figura 13 - Biomassa real (BM_{obs}) e simulado (BM_{sim}) e Rendimento de grãos real (Y_{obs}) e simulado (Y_{sim}) em função dos Dias Após a Semeadura (DAS) para a cultura do milho na região de Rio Largo, AL.



Fonte: Autor (2015).

Salienta-se que os dados apresentados na E4 (Figura 12d) foram devido a modificação na profundidade do sistema radicular de 60 para 75 cm, que representou redução de 16,7 % no erro da estimativa.

Tabela 6 - Produção de biomassa final observada (BT_{OBS}) e simulada (BT_{SIM}) e rendimento de grãos observado (Y_{OBS}) e simulado (Y_{SIM}) para as regiões de Arapiraca e Rio Largo.

Época de semeadura	BT_{OBS} Mg ha⁻¹	BT_{SIM} Mg ha⁻¹	ERRO (%)	Y_{OBS} Mg ha⁻¹	Y_{SIM} Mg ha⁻¹	ERRO (%)
Arapiraca-AL						
E1	11,05	10,66	3,52	3,72	4,59	21,7
E2	12,26	11,25	8,97	4,18	4,81	15,0
E3	12,26	8,17	33,3	4,49	3,17	29,3
E4	10,37	8,03	34,5	1,96	2,77	41,3
Rio Largo-AL						
E1	15,67	10,16	35,16	3,50	5,01	43,1
E2	17,42	12,62	27,15	3,72	5,69	52,9
E3	16,27	12,81	21,26	3,35	3,38	0,80
E4	15,22	12,68	16,68	2,20	5,92	169,0

As estimativas da BM para a região de Rio Largo-AL (Figura 13) resultaram em ERRO de 49%, RMSE de 2,62 Mg ha⁻¹ e EF de 0,94. A comparação entre valores de BT, tiveram em erro percentual variando entre 16,68% (E4) e 35,16 % (E1). A E4 teve BT_{OBS} de 15,22 Mg ha⁻¹ e BT_{SIM} de 12,68 Mg ha⁻¹ e E1 teve BT_{OBS} de 15,67 Mg ha⁻¹ e BT_{SIM} de 10,16 Mg ha⁻¹. A E2 teve BT_{OBS} de 17,42 Mg ha⁻¹ e BT_{SIM} de 12,69 Mg ha⁻¹, resultando em um ERRO de 27,1 %. A E3 teve BT_{OBS} de 16,27 Mg ha⁻¹ e BT_{SIM} de 12,81 Mg ha⁻¹, com ERRO de 21,2 %. O modelo APSIM simulou bem o Y para E3 (Figura 13c) com baixo erro de 0,8 %, sendo esse, o menor entre todas as estimativas. A E2 teve Y_{obs} de 3,72 Mg ha⁻¹ e Y_{sim} de 5,69 Mg ha⁻¹, com ERRO de 52,9%.

O baixo desvio percentual observado na estimativa do rendimento de grãos (Y) para as épocas de semeadura referentes a Arapiraca (E1, E2, E4) e Rio Largo (E3), provavelmente ocorreu devido ao Y ser calculado pontualmente em função dos valores da produção de biomassa (razão entre a produção de biomassa total da planta e biomassa de grãos). Ou seja, durante a simulação, as fases de crescimento que obtiveram baixos desvios para a produção de biomassa compensaram os altos desvios, e também pelo fato do modelo ter reproduzido satisfatoriamente os valores de BT_{OBS} para a maioria das épocas avaliadas, contribuindo para uma estimativa de Y mais precisa.

5. CONCLUSÕES

O APSIM-Maize mostrou-se satisfatório na estimativa da dinâmica de água do solo, em que, a parametrização com dados físico-hídricos contribuíram para a boa performance do modelo no cálculo do armazenamento de água, principalmente, para a região de Arapiraca-AL. Para Rio Largo-AL, as estimativas da dinâmica de água do solo obteve desempenho inferior, porque o APSIM não reproduziu adequadamente as observações em dias ou períodos com alto acúmulo de precipitação. O modelo identificou uma característica do solo da região (camada adensada do solo em ~30cm de profundidade) mas não conseguiu reproduzi-la adequadamente. Isso resultou em subestimativa da drenagem, que foi ajustada para melhor representar os dados observados. Tais fatores reforçam a importância da calibração do modelo para os diferentes tipos de solo. A calibração realizada nesse estudo não se aplica a todas as regiões do Estado de Alagoas, pois somente é válida para as condições edafoclimáticas avaliadas. As simulações do conteúdo de água solo para a região de Rio Largo-AL foram classificadas como boas.

A variável de crescimento (índice de área foliar) apresentou estimativa razoável. Na maioria das épocas avaliadas, o APSIM representou melhor as observações até cerca de 60 dias após a semeadura. Em alguns casos o modelo reproduziu adequadamente as observações durante todo o processo de desenvolvimento da cultura. Para a simulação de Arapiraca-AL, a época mais tardia apresentou melhores resultados quando a profundidade efetiva do sistema radicular foi aumentada. A calibração referente às propriedades fenológicas da variedade utilizada (AL Bandeirante) foi imprescindível para o modelo simular o crescimento/desenvolvimento da cultura, dentro da realidade experimental.

Apesar do desempenho razoável do índice de área foliar, as variáveis de produção da cultura do milho foram estimadas com mau desempenho no decorrer dos ciclos da cultura. Esperava-se maior precisão na estimativa da biomassa durante o processo de crescimento, principalmente para as épocas que as estimativas do IAF foram mais precisas. Apesar disso, os valores pontuais da biomassa final e rendimento de grãos, apresentaram baixos desvios percentuais, e de modo geral tiveram boas estimativas.

Por fim, O APSIM-Maize, se mostrou um modelo confiável na estimativa das componentes do balanço de água no solo. Mas, apresentou inconsistências em alguns casos para simulações de variáveis de crescimento e produção. Portanto, a aplicação do APSIM-Maize para a região estudada, ainda requer cautela e uma adequada validação referente a calibração realizada nesse estudo.

6. REFERÊNCIAS

- ABEDINPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T.B.S.; SINGH, M.; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v.110, p.55-65, 2012.
- ANDRADE, F.H.; UHART, S.A.; CIRILO, A. Temperature Affects radiation use efficiency in maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.32, p.17-25, 1993.
- ASSENG, S.; KEATING, B.A.; FILLERY, I.R.P.; GREGORY, P.J.; BOWDEN, J.W.; TURNER, N.C.; PALTA, J.A.; ABRECHT, D.G. Performance of the APSIM-wheat model in Western Austrália. **Field Crops Research**, v.57, p.163-179, 1998.
- APSIM. **APSIM Maize module**, disponível em:
<<http://www.apsim.info/Documentation/Model,CropandSoil/CropModuleDocumentation/Maize.aspx>> Acesso em 21 jan. 2015a.
- APSIM. **APSIM SoilWat module**, disponível em:
<<http://www.apsim.info/Documentation/Model,CropandSoil/SoilModulesDocumentation/SoilWat.aspx>> Acesso em 21 jan. 2015b.
- ARCHONTOULIS, S.V.; MIGUEZ, F.E.; MOORE, K.J. Evaluating APSIM Maize, Soil Water, Soil Nitrogen, Manure, and Soil Temperature Modules in the Midwestern United States. **Agronomy Journal**, v.106, p.1025-1040, 2014.
- BAI, P.; BANKS, H.Y.; DEDIU, S.; GOVAN, A.Y.; LAST, M.; LLOYD, H.K.; NGUYEN, M.S.; REMPALA, G.; SLENNING, B.D. Stochastic and deterministic model for agricultural production networks. **Mathematical, biosciences and engineering**. v.3, nº3, p.373-402, 2007.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MULLER, G.A.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v.39, n.9, p.831-839, 2004.
- CALDERELLI, C.A.; BACCHI, M.P.R. **Fatores de influência no preço do milho no Brasil**. Brasília-DF, Embrapa Informação Tecnológica. 2010. Disponível em:
<http://www.embrapa.br/publicacoes/tecnico/folderTextoDiscussao/arquivos-pdf/Texto-39_30-03-11.pdf> Acesso em: 04 out. 2012
- CHRISTIN, P.A.; OSBORNE, C.P.; CHARTELET, D.S.; COLUMBUS, J.T.; BESNARD, G.; HODKINSON, T.R.; GARRISON, L.M.; VORONTSOVA, M.S.; EDWARDS, E.J.

Anatomical enablers and the evolution of C4 photosynthesis in grasses. **PNAS**. v.110, no 4, p.1381-1386, 2012.

CARBERRY, P.S., MUCHOW, R.C. HAMMER GL. Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. II. Individual leaf level. **Field Crops Research**, v.33, p.311–328, 1993.

de WIT, C.T. Photosynthesis of leaf Canopies, Report 663, **Center for Agric. Publ. and Doc.**, Wageningen, The Netherlands. 1965.

de WIT, C.T. Coordination of models. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; Van LAAR, H.H. (Ed.) Simulation of plant growth and crop production. Wageningen: PUDOC, 1982.

DOORENBOS, J. & KASSAN, A.H. Yield response to water. **FAO**. Irrigation and Drainage Paper 33, p.193, 1979.

FAO. FAOSTAT online database, disponível em: < <http://faostat3.fao.org/>> Acesso em 21 jan. 2015.

FAO. FAOSTAT online database, disponível em: <<http://faostat.fao.org>> Acesso em 03 out. 2012.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 4ªed., Livroceres, Piracicaba, 306 p, 2004.

FERREIRA JUNIOR, R.A.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; LYRA, G.B.; DE SOUZA, R.C.; ARAÚJO NETO, R.A. Eficiência do uso da radiação em cultivos de milho em Alagoas. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.18, n.3, p.322–328, 2014.

FERREIRA JUNIOR, R.A.; SOUZA, J.L.; LYRA, G.B.; TEODORO, I.; SANTOS, M.A.; PORFÍRIO, A.C.S. Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.11, p.1229-1236, 2012.

FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v.18, p.267–288, 2003.

FREITAS, P.S.L.F.; MANTOVANI, E.C.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A.C.A.G.; BERTONHA, A. Influência da radiação solar sobre os valores de produtividade da cultura do milho, *Zea mays* L., simulados pelo modelo CERES-Maize. **Acta Scientarum**, v.23, n.5, p.1221-1227, 2001.

GADIOLI, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A.G.; BASANTA, M.V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calorífica. **Scientia Agricola**, v.57, n.3, p.377-383, jul./set. 2000.

GOURDJI, S.; LADERACH, P.; VALLE, M.A.; MARTINEZ, C.Z.; LOBELL, D.B. Historical climate trends, deforestation, and maize and bean yields in Nicaragua. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.200, p.270–281, 2015.

GODOY, C.V.; AMORIM, L.; BERGAMIN FILHO, A. Alterações na fotossíntese e na respiração de folhas de milho infectadas por *Phaeosphaeria maydis*. **Fitopatologia Brasileira**, v.26, p.209-215, 2001.

HAMMER, G.L.; OOSTEROM, E.V.; MCLEAN, G.; CHAPMAN, S.C.; BROAD, I.; HARLAND, P.; MUCHOW, R.C. Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits on field crops. **Journal of Experimental Botany**, v.61, n.8, p. 2185-2202, 2010.

HAMMER, G.L.; MUCHOW, R.C. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. I. Development and testing of a simulation model. **Field Crops Research**, v.36, p.221-234, 1994.

HATTERSLEY, P.W. Characterization of C4 type leaf anatomy in grasses (Poaceae). Mesophyll: budles sheath area ratios. **Annual of Botany**, v.53, p.163-179. 1984.

HOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.137-157. 2000.

HUTH, N.I.; HENDERSON, C.; PEAKE, A. Developmente and testing of a horticultural crop model within APSIM. In: 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Austrália, 13-19 jul, 2009.

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.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development**. Texas A&M University Press, College Station, TX, 1986.

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

KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R., VANDERLIP, R.L., ATWOOD, J.D., REICOSKY, D.C., MULLIKEN, J., COX, W.J., MASCAGNI, H.J., HOLLINGER, S.E.; WIEBOLD, W.J. Evaluation of two maize models for nine US locations. **Agronomy Journal**. v.89, p.421-426, 1997.

KONG, F.; CAI, W.; SHI, L.; CHEN, F. The characteristics of Annual Water Consumption for Winter Wheat and Summer Maize in North China Plain. **Procedia Engineering**, v.28 p.376-381, 2012.

KUNZ, J.H.; BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; HACKLER, B.M.M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.11, p.1511-1520, 2007.

LITTLEBOY, M.; SILBURN, D. M.; FREEBAIRN, D. M., WOODRUFF, D. R., HAMMER, G. L.; LESLIE, J. K. Impact of soil erosion on production in cropping systems. I. Development and validation of a simulation model. **Australian Journal Soil Research**, v.30, p.757-774, 1992.

LOAGUE, K.; GREEN, R.E., Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. In: P.J Wierenga (Guest Editor), Validation of Flow and Transport Models for the Unsaturated Zone. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.7, p.51-73, 1991.

LYRA, G.B.; SOUZA, J.L.S., TEODORO, I.; LYRA, G.B.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JUNIOR, R.A. 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.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M.; CARNEIRO, N.P.; SILVA, E. Fisiologia do milho. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, p.23 (EMBRAPA-CNPMS Circular Técnica, 22), 2002.

Disponível em:

<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/publica/2002/circular/Circ_22.pdf> Acesso em: 20 jan. 2015.

MA, L.L.R.; AHUJA, S.A.; SASEENDRAN, R.W.; MALONE, T.R.; GREEN, B.T.; NOLAN.; BARTILING, P.N.S.; FLERCHINGER, G.N.; BOOT, K.J.; HOOGENBOOM, G. **A protocol for parameterization and calibration of RZWQM2 in field research.** In: L.R. Ahuja and L. Ma, editors, Methods of introducing system models into agricultural research. SSSA Book Ser. SSSA, Madison, WI. p.1–64, 2011.

MARCHÃO, R.L.; BRASIL, E.M.; XIMENES, P.A. Interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e rendimento de grãos de milho adensado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.5, p.170-181, 2006.

MCCOWN, R.L.; HAMMER, G.L.; HARGREAVES, J.N.G.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N.I. APSIM: na agricultural production system simulator model for operational research. **Mathematics and Computers in Simulation**. v.39, p. 225-321, 1995.

MCCOWN, R.L. & WILLIAMS, J. AUSIM: **A cropping systems model for operational research**, Proc. SSA IMACS, Biennial Conference on Modelling and Simulation, ANU, 1989.

MEDEIROS, R.P. **Componentes do balanço de água e de radiação solar no desenvolvimento do milho em quatro épocas de semeadura no agreste de Alagoas.** 2009. 76 p. Dissertação (Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2009.

MEINKE, H.; G.L. HAMMER.; P.J. Want. Potential soil water extraction by sunflower on a range of soils. **Field Crops Research**, 32, 59-81, 1993.

MEINKE, H.; HAMMER, L.G.; VAN KEULEN, H.; RABBINGE, R.; KEATING, B.A. Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping system perspective: water and nitrogen effects on spring wheat in a semi-arid environment. **European Journal of Agronomy**, v.7, p.75-88, 1997.

MOHANTY, M.; PROBERT, M.E.; REDDY, K.S.; DALAL, R.C.; MISHRA, A.K.; RAO, A.S.; SINGH, M.; MENZIES, N.W. Simulating soybean-wheat cropping system: APSIM model parametrization and validation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.152, p.68– 78, 2012.

MURTHY, V.R.K. **Crop growth modeling and its applications in agricultural meteorology. In: satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology.** Ed. Sivakumar, M. V. K.; Roy, P. S.; Harmsen, K. and Saha, S. K. p.235-261, 2004.

MUCHOW, R.C.; SINCLAIR, T.R.; BENNETT, J.M. Temperature and Solar Radiation Effects on Potential Maize Yield across Locations. **Agronomy Journal**, v.82, p.338-343, 1990.

NAIR, S.S.; KANG, S.; ZHANG, X.; MIGUEZ, F.E.; IZAURRALDE, R.C.; POST, W.M.; DIETZE, M.C.; LYND, L.R.; WULLSCHLEGER, S.D. Bioenergy crop models: descriptions, data requirement and future challenges. **CGB Bioenergy**, 2012. doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01166.x

NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. **Journal Hydrology** v.10, p.282–290, 1970.

PRIESACK, E.; GAYLER, S.; HARTMANN, H.P. The impact of crop growth sub-model choice on simulated water and nitrogen balances. **Nutrition Cycle Agroecosystem**, v.75, p.1–13, 2006.

PROBERT, M.E., DIMES, J.P., KEATING, B.A., DALAL, R.C., STRONG, W.M. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. **Agricultural System**, v.56(1), p.1-28, 1998

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

RITCHIE, J.T., GODWIN, D.C., OTTER, S. **CERES-wheat: A user-oriented wheat yield model**. Preliminary documentation. AGRISTARS Publication No. YM-U3-04442-JSC 18892. Michigan State University, MI, p.252, 1985.

SANTOS, M.V.C. **Produtividade de milho na região de Arapiraca-AL por modelos agrometeorológicos**. 2013. 49p. TCC (Graduação em meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

SINGH, B.; EBERBACK, P.L.; HUMPHREYS, E. Simulation of the evaporation of soil water beneath a wheat crop. **Agricultural Water Management**, v.135 p.19– 26, 2014.

SINGER, J.W., D.W. MEEK, T.J. SAUER, J.H. PRUEGER, AND J.L. HATFIELD. Variability of light interception and radiation use efficiency in maize and soybean. **Field Crops Research**, v.121, p.147–152, 2011. doi:10.1016/j.fcr.2010.12.007

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, v.65, p.216-265, 1999.

SILVA, M.B.P. **Desenvolvimento de milho em função de variáveis agroambientais em diferentes épocas de sementeio**. 64p. TCC (Graduação em Agronomia). UFAL, Rio Largo-AL, 2013.

SNOW, V.O.; HOULBROOKE, D.J.; HUTH, N.I. Predicting soil water, tile drainage, and runoff in a mole-tile drained soil, **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v.50, n.1, p.13-24, 2007. DOI: 10.1080/00288230709510278

SNOW, V.O.; N.I. HUTH. **The APSIM-Micromet Module**, Internal Report No. 2004/12848, HortResearch, p.18, Auckland, New Zealand, 2004.

SOUZA, J.L. **Avaliação Agroclimática de Quatro Microrregiões do Estado de Minas Gerais para Alguns Cultivares de Feijão**. 1989. 70p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa – MG, 1989.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D. Crop yield response water. Irrigation and drainage paper No 66, **FAO**; Rome, p.503. 2012.

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.

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 Queiroz, ESALQ/USP. 2004.

VERBERG, K., ROSS, P.J., BRISTOW, K.L. **SWIMv2.1 User Manual**. Divisional Report No 130. CSIRO Division of Soils, Canberra, Australia, 1996.

WANG, E., M.J. ROBERTSON, G.L. HAMMER, P.S. CARBERRY, D. HOLZWORTH, H. MEINKE.; CHAPMAN, S.C.; HARGREAVES, J.N.G.; HUTH, N.I.; MCLEAN, G. Development of a generic crop model template in the cropping systems model APSIM. **European Journal Agronomy**, v.18, p.121–140, 2002. doi:10.1016/S1161-0301(02)00100-4

WEI, Z.; PAREDES, P.; LIU, Y.; CHI, W.W.; PEREIRA, L.S. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. **Agricultural Water Management**, v.147, p.43–53, 2015.

WILSON, D.R.; MUCHOW, R.C.; MURGATROYD, C.J. Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. **Field Crops Research**. v.43, p.1-18. 1995.

YANG, J.M.; YANG, J.Y.; LIU, S.; HOOGENBOOM, G. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. **Agricultural Systems**, v.127, p.81-89, 2014a.

YANG, Y.; YANG, Y.; HAN, S.; MACADAM, I.; LIU, D.L. Prediction of cotton yield and water demand under climate change and future adaptation measures. **Agricultural Water Management**, v.144, p.42–53, 2014b.

YANG, H.S.; DOBERMANN, A.; LINDQUIST, J.L.; WALTERS, D.T.; ARKEBAUER, T.J. Hybrid-maize – a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. **Agronomy & Horticulture** – Faculty Publications. Paper 137, 2004.
<http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/137>

ZELEKE, K.T.; LUCKETT, D.J.; COWLEY, R.B.; The influence of soil water conditions on canola yields and productions in Southern Australia. **Agricultural Water Management**, v.144, p.20–32, 2014.

APÊNDICE A – Código-fonte da variedade AL Bandeirante inserido no modelo.

```

<ALBandeirante cultivar="yes">
  <!--
    GRAIN GROWTH
  -->
  <head_grain_no_max description="450 in CM-KEN ()">500 </head_grain_no_max>
  <grain_gth_rate units="mg/grain/day" description="10.5 in CM-KEN">10.5</grain_gth_rate>
  <!--
    CANOPY HEIGHT - function of stem biomass per plant (need to adjust this for density effects)
  -->
  <x_stem_wt units="g/stem" description="look up table for canopy height">0 80</x_stem_wt>
  <y_height units="mm" description="plant canopy height">0 2000</y_height>
  <!--
    PHENOLOGY
  -->
  <tt_emerg_to_endjuv description="135 ! 125 in CM-KEN (oC)">196.08</tt_emerg_to_endjuv>
  <est_days_endjuv_to_init>20</est_days_endjuv_to_init>
  <tt_endjuv_to_init units="oC">0.0</tt_endjuv_to_init>
  <photoperiod_crit1 units="hours">12.5</photoperiod_crit1>
  <photoperiod_crit2 units="hours">24.0</photoperiod_crit2>
  <photoperiod_slope units="oC/hour">10.0</photoperiod_slope>
  <tt_flower_to_maturity description="660 in CM-KEN (oC)">488.1 </tt_flower_to_maturity>
  <tt_flag_to_flower units="oC">10</tt_flag_to_flower>
  <tt_flower_to_start_grain units="oC">68.5</tt_flower_to_start_grain>
  <tt_maturity_to_ripe units="oC">1</tt_maturity_to_ripe>
  <x_stem_wt units="g/stem" description="look up table for canopy height">0 80</x_stem_wt>
  <y_height units="mm" description="plant canopy height">0 2000</y_height>

</ALBandeirante>

```