



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

Nº de ordem: MET – UFAL – MS - 071

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL EM CULTIVO DE MILHO NO AGRESTE  
ALAGOANO**

**Eduardo Cabral da Silva**

Maceió - AL  
Fevereiro - 2010

**EDUARDO CABRAL DA SILVA**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL EM CULTIVO DE MILHO NO  
AGRESTE ALAGOANO**

Dissertação de mestrado apresentada a  
Universidade Federal de Alagoas, para  
obtenção do título de Mestre em Meteorologia  
Área de Concentração: **Processos de  
Superfície Terrestre.**

Orientador: José Leonaldo de Souza  
Co-orientador: Gustavo Bastos Lyra

Maceió - AL  
Fevereiro – 2010

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale**

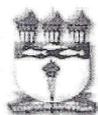
S586e Silva, Eduardo Cabral da.  
Evapotranspiração real em cultivo de milho no agreste alagoano / Eduardo Cabral da Silva, 2010.  
viii, 58 f : il.

Orientador: José Leonaldo de Souza.  
Co-Orientador: Gustavo Bastos Lyra.  
Dissertação (mestrado em Meteorologia: Processos de Superfície Terrestre) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2010.

Bibliografia: f. 52-58.

1. Meteorologia agrícola – Maceió (AL). 2. Evapotranspiração. 3. Milho – Cultivo. 4. Manejo de irrigação. I. Título.

CDU: 551.573



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

## CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-071.

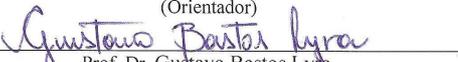
*“EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL EM CULTIVO DE MILHO NO AGRESTE  
ALAGOANO”*

*Eduardo Cabral da Silva*

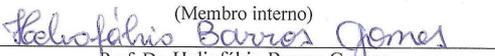
Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

  
Prof. Dr. José Leonaldo de Souza  
(Orientador)

  
Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra  
(Co-orientador)

  
Prof. Dr. Manoel da Rocha Toledo Filho  
(Membro interno)

  
Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes  
(Membro externo – SEMARH)

Fevereiro/2010

Aos meus amados irmãos e irmãs  
Roberto, Graça, Ricardo e Silvana e  
a todos os meus familiares  
OFEREÇO.

As minhas duas mães, Cícera Cabral  
e Jandira Feijó, ao meu pai, Ivanildo  
Cabral, que sempre serão os meus  
maiores exemplos de vida, e a minha  
esposa, Luciana de Omena por todo o  
amor, carinho e compreensão  
DEDICO.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa por todo amor, carinho, compreensão e ajuda prestada em todos os momentos da nossa caminhada.

A todos os meus familiares que sempre me incentivam e me auxiliam nas horas mais difíceis da minha vida, em especial meus irmãos, minhas mães, meu pai, José Carlos, Núbia Roberta e Maria de Fátima.

Aos meus pais orientadores, José Leonaldo de Souza e Gustavo Bastos Lyra, por todos os conselhos, incentivos e ajudas prestadas.

Aos professores do Instituto de Ciências Atmosféricas que sempre estiveram a disposição para consultas em toda a minha vida acadêmica, em especial Dr. Manoel da Rocha Toledo Filho, Dr. Marcos Antônio Lima Moura e Dr. Manoel Ferreira do Nascimento Filho.

Aos meus colegas de trabalho Ricardo Ferreira, Anthony Carlos, Mercel José, Marcos Alex, Ronabson Fernandes, Paulo José e André Luiz.

## EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL EM CULTIVO DE MILHO NO AGRESTE ALAGOANO

SILVA, Eduardo Cabral, Evapotranspiração real em cultivo de milho no agreste alagoano. Orientador: Dr. José Leonaldo de Souza. Maceió-AL, 2010. 58 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia).

O milho é uma gramínea, que devido as suas diversas aplicabilidades e ao seu alto poder de adaptação a adversidades climáticas é cultivado em praticamente todos os lugares do mundo. Esse cereal possui altíssimo poder nutritivo, devido a sua alta concentração de amido, constituindo-se por vezes, a base de sustentação alimentícia da população. Na indústria de alimentos o milho é utilizado como ingrediente principal para produção de diversos produtos, como, óleos, refrigerantes e outros. É largamente utilizado para a produção de farelo animal e atualmente vem se enquadrando no mercado de biocombustíveis, para a produção de etanol. As variações ambientais sazonais de uma determinada região constituem um fator primordial para a produtividade agrícola, nesse contexto, o estudo dos elementos ambientais, como a precipitação pluvial, a temperatura do ar e a radiação solar incidente na superfície terrestre, se tornam imprescindíveis. A evapotranspiração real indica quanto uma superfície vegetada perdeu de água em determinado intervalo de tempo, sendo assim, seu conhecimento subsidiará a determinação da quantidade de água necessária para se repor a cultura, isso implicará em ausência de estresse hídrico e conseqüentemente maior produtividade e melhor uso dos recursos naturais. Com base no predito, o objetivo desse trabalho é avaliar os métodos, de Penman-Monteith original e do Coeficiente da Cultura Simples de estimativas de evapotranspiração real (ETR), associados, respectivamente, com esquemas para determinação da resistência da cultura e do coeficiente de redução de água do solo, para determinar as necessidades reais de água da cultura do milho em cada fase fenológica e durante o seu ciclo. O estudo foi realizado com base nos dados obtidos no sítio experimental instalado na Vila São José, localizada no município de Arapiraca, Alagoas (09° 38' 35,3" S; 36° 40' 15,5"W; 260 m) no período de junho a setembro de 2005. A variedade de milho utilizada foi a BR 106 cultivado em regime de sequeiro. A evapotranspiração real diária foi determinada como resíduo do balanço de água no solo, com a variação do conteúdo de água no solo obtida para o perfil de 0 – 0,30 m. O sub-modelos da resistência da cultura avaliados foram o proposto por Ortega-Farias (Ortega-Farias et al., 2004) e o sub-modelo em função da resistência foliar a difusão de vapor d'água parametrizada pelo índice de área foliar. Considerou-se no segundo sub-modelo duas resistências foliar, i)  $r_s = 100 \text{ s m}^{-1}$  proposta por Monteith (1965) e ii)  $r_s = 73,2 \text{ s m}^{-1}$ , obtida de medidas de campo com um analisador de gases ao infravermelho. A influência da disponibilidade de água no solo na evapotranspiração foi determinada pelo coeficiente de redução de água no solo estimados por três métodos, i) método de decaimento logarítmico, ii) método boletim FAO56, decaimento linear a partir da água facilmente disponível e iii) decaimento hiperbólico. Os resultados mostram que os valores de ETR estimados pelo sub-modelo do coeficiente de redução de água no solo ( $K_s$ ) hiperbólico, incorporado ao método do coeficiente da cultura simples, apresentaram baixa dispersão, com coeficiente de determinação entre os valores observados (balanço de água no solo) e estimados ( $r^2$ ) de 0,561, e concordância satisfatória, com raiz do quadrado médio do erro (RQME) de 0,71 mm d<sup>-1</sup>. Dispersão e concordância análoga foi obtida com o sub-modelo que parametrizou a resistência da cultura pelo Índice de Área Foliar (IAF) aplicado ao

método de Penman-Monteith original e ao coeficiente de redução de água no solo hiperbólico, sobressaindo-se quando utilizada a resistência foliar a difusão de vapor d'água ( $r_s = 100 \text{ s m}^{-1}$ ) sugerida Monteith (1965) ( $r^2 = 0,602$  e  $RQME = 0,70 \text{ mm d}^{-1}$ ). Com embasamento nos modelos preditos, observou-se que o maior consumo de água pela superfície vegetada ocorreu na fase intermediária (55 a 95 DAP), oscilando entre 106,8 e 122,6 mm.

## REAL EVAPOTRANSPIRATION IN CORN CULTIVATION IN ALAGOANO NORTHEAST DRY AREA

SILVA, Eduardo Cabral. REAL EVAPOTRANSPIRATION IN CORN CULTIVATION IN ALAGOANO NORTHEAST DRY AREA. Adviser: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza. Maceió - AL, 2010. 59p.; Dissertation (Meteorology master degree).

Corn is a grass, with its diverse applicability and its high power of adaptation from adverse weather is grown in virtually every places of the world. This cereal has very high nutritional value for the reason that its high starch concentration, at times, the population food basis. Food industries use corn as the main ingredient to produce several products, such as oils, soft drinks and other. It is widely used for animal meal production and currently it has been framed in the market of bio-fuels for ethanol production. Seasonal environmental changes, in a specific area, are the major factor in agricultural productivity, in this context, the study of environmental factors, such as rainfall, air temperature and solar incident radiation on the surface, become indispensable. Real evapotranspiration indicates how many water a vegetated surface lost in a given time, so their knowledge will subsidize the determination of the amount of water needed to restore the culture. That will mean absence of water stress and consequently higher productivity and better use of natural resources. Based on the predicted, this study aimed to evaluate the methods of Penman-Monteith original and the Culture Simple coefficient to estimate real evapotranspiration (ETR), respectively associated with schemes to determination of the culture resistance and the reduction coefficient of soil water, to determine the real needs of water in each stage of corn cultivation and during its cycle. The study was based on data from an experimental area installed at São José Villa, located in Arapiraca city, Alagoas (09 ° 38 '35.3 "S, 36 ° 40' 15.5" W, 260 m) during June-September 2005. The variety of maize used was BR 106 grown in rainfed conditions. Daily real evapotranspiration was determined with soil water residue balance, with variation of the water content obtained in the soil profile 0 to 0.30 m. The sub-culture resistance models evaluated were proposed by Ortega-Farias (Ortega-Farias et al., 2004) and the sub-model as a leaf resistance function to water vapor diffusion parameterized by the leaf area index. The second sub-model was considered two leaf resistances i)  $r_s = 100 \text{ s m}^{-1}$  proposed by Monteith (1965) and ii)  $r_s = 73.2 \text{ m s}^{-1}$ , obtained from field measurements with infrared gas analyzer. The influence of soil water availability in evapotranspiration was determined by the water reduction soil coefficient estimated by three methods, i) logarithmic decay method, ii) FAO 56 bulletin method, linear decay from easily available water and iii) hyperbolic decay. The results demonstrated that ETR estimated value by the hyperbolic sub-model water reduction coefficient in the soil ( $K_s$ ), embedded in the simply culture coefficient method showed low dispersion, with determination coefficient between observed values (water soil balance) and ( $r^2$ ) estimated 0.561, and satisfactory agreement, with root mean square error (RMSE) of 0.71 mm d<sup>-1</sup>. Dispersion and similar agreement was obtained with the sub-model that parameterize the culture strength by Leaf Area Index (LAI) applied to Penman-Monteith original and the hyperbolic water reduction coefficient in soil, being prominent when used leaf resistance to water vapor diffusion ( $r_s = 100 \text{ s m}^{-1}$ ) suggested by Monteith (1965) ( $r^2 = 0.602$  and RMSE = 0.70 mm d<sup>-1</sup>). Based in the predicted models, was found that increased water consumption by the vegetated surface occurred at the intermediate stage (55-95 DAP), ranging between 106.8 and 122.6 mm.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figuras</b>		<b>Pág</b>
<b>1</b>	Fenologia do milho: estádios de desenvolvimento da cultura. Adaptado de Fancelli (1986) e Iowa State University Extension (1993).	7
<b>2</b>	Valores de Kc para milho nas diferentes fases do ciclo e condições climáticas.	16
<b>3</b>	Área experimental com a cultura de milho, Vila São José, Arapiraca - Alagoas em 2005.	19
<b>4</b>	Estação Meteorológica Automática situada no centro do experimento de milho em Arapiraca/Alagoas.	23
<b>5</b>	Variação da Precipitação (P) da e evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ) em função dos dias após o plantio (DAP) no município de Arapiraca - Alagoas. Em detalhe as fases fenológicas descritas no boletim FAO-56 para a cultura do milho.	34
<b>6</b>	Variação da Temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR) do período diário em função dos dias após o plantio (DAP) no município de Arapiraca-AL, no período de junho a setembro de 2005.	36
<b>7</b>	Variação da Radiação solar global (R <sub>g</sub> , MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> ) e do saldo de radiação (R <sub>n</sub> , MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> ) para um cultivo de milho em Arapiraca- AL no período de junho a setembro de 2005.	38
<b>8</b>	Variação do conteúdo de água no solo (A <sub>L</sub> , mm) para um cultivo de milho em Arapiraca-AL no período de junho a setembro de 2005. Em destaque o conteúdo de água na capacidade na capacidade de campo (A <sub>cc</sub> ), e no ponto de murcha permanente (A <sub>pm</sub> ) e água facilmente disponível (AFD).	39
<b>9</b>	Variação da altura da planta (h <sub>c</sub> ) em função dos dias após o plantio (DAP) para um cultivo de milho em Arapiraca-AL no período de junho a setembro de 2005. Os pontos pretos são os valores de h <sub>c</sub> medidos em campo e a linha vermelha indica a simulação de h <sub>c</sub> pela equação Sigmoidal de Boltzmann.	40
<b>10</b>	Variação do Índice de Área Foliar (IAF) em função dos dias após o plantio (DAP) para um cultivo de milho em Arapiraca-AL no período de junho a setembro de 2005. Os pontos pretos são os valores de IAF medidos em campo e a linha vermelha indica a simulação de IAF pela equação Sigmoidal de Boltzmann.	41

- 11** Estimativa da Evapotranspiração Real para um cultivo de milho em Arapiraca - AL no período de junho a setembro de 2005 pelo método do coeficiente simples, utilizando Ks logarítmico (Bernardo, 1995) ( $ETR_{1,a}$ ), boletim FAO56 (Allen et al., 1998) ( $ETR_{1,b}$ ) e Ks hiperbólico (Noilhan e Planton, 1989) ( $ETR_{1,c}$ ) e a evapotranspiração pelo balanço hídrico (ETR). 43
- 12** Relação entre a evapotranspiração real pelo balanço de água no solo ( $ETR_{BH}$ ) e a evapotranspiração pelo método do coeficiente simples ( $ETR_1$ ) para um cultivo de milho em Arapiraca - AL no período de junho a setembro de 2005. Em que: a) Ks logarítmico ( $ETR_{1,a}$ ); b) Ks FAO56 ( $ETR_{1,b}$ ); c) Ks hiperbólico ( $ETR_{1,c}$ ). 45
- 13** Estimativa da evapotranspiração real para um cultivo de milho em Arapiraca - Alagoas pelo método de Penman-Monteith original, utilizando rc proposto por Ortega-Farias ( $ETR_{2,a}$ ), Monteith ( $ETR_{2,b}$ ), média dos valores medidos pelo IRGA ( $ETR_{2,c}$ ) e a evapotranspiração real pelo balanço de água no solo (ETR). 49
- 14** Relação entre a evapotranspiração real pelo balanço de água no solo ( $ETR_{BH}$ ) e a evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith original ( $ETR_2$ ) para um cultivo de milho em Arapiraca - AL no período de junho a setembro de 2005. Em que: a) rc Ortega-Farias ( $ETR_{2,a}$ ); b) rc Allen et AL., 1998 ( $ETR_{1,b}$ ); c) rc IRGA ( $ETR_{1,c}$ ). 50

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabelas</b>		<b>Pág</b>
<b>1</b>	Características agronômicas da variedade de milho BR106	13
<b>2</b>	Análise granulométrica (física) e classificação textural do solo da área experimental.	20
<b>3</b>	Resultado da análise química do solo.	20
<b>4</b>	Duração e período das fases de desenvolvimento para um cultivo de milho em Arapiraca/Alagoas no período de abril a setembro de 2005.	28
<b>5</b>	Variação da Nomenclatura de ETR estimada pelo método do Kc único ( ETR <sub>1</sub> ) em função dos métodos de determinação do coeficiente de redução de água no solo (Ks).	29
<b>6</b>	Variação da nomenclatura de ETR estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ETR <sub>20</sub> ) de acordo com os métodos de determinação da resistência da cultura (rc).	32
<b>7</b>	Valores da evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> , mm d <sup>-1</sup> ) por fase de desenvolvimento do milho na região de Arapiraca - AL no período de junho a setembro de 2005	35
<b>8</b>	Temperaturas mínimas, médias e máximas diárias do ar e Graus Dias para as fases fenológicas em um cultivo de milho em Arapiraca- AL, no período de junho a setembro de 2005.	37
<b>9</b>	Parâmetros da Equação Sigmóidal de Boltzmann para estimativa da altura da planta (h <sub>c</sub> ) em função dos DAP.	40
<b>10</b>	Parâmetros da Equação Sigmóide de Boltzmann para estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) em função dos DAP.	42
<b>11</b>	Valores mínimos, médios e máximos de ETR <sub>1</sub> e ETR <sub>BH</sub> . Em detalhes os dias após o plantio nos quais os valores foram observados.	
<b>12</b>	Valores mínimos, médios e máximos de ETR <sub>2</sub> e ETR <sub>BH</sub> . Em detalhes os dias após o plantio nos quais os valores foram observados.	

- 13** Média aritmética e desvio padrão da evapotranspiração real pelo balanço de água no solo e estimada i) método do coeficiente simples, utilizando várias formas de ponderar a variabilidade de água no solo ( $K_s$ ) e ii) método de Penman-Monteith original, utilizando diferentes métodos para obtenção da resistência da cultura, Quadrado médio do erro, intercepto (a) e coeficiente angular (b) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da regressão linear entre os valores estimados e medidos, para os métodos avaliados 46

## RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

<b>AD</b>	Água Disponível
<b>AFD</b>	Água Facilmente Disponível
<b>CAD</b>	Capacidade de Água Disponível
<b>CC</b>	Capacidade de Campo
<b>CECA</b>	Centro de Ciências Agrárias
<b>DAP</b>	Dias Após o Plantio
<b>ET</b>	Evapotranspiração
<b>EUR</b>	Eficiência no Uso de Radiação
<b>FAO</b>	Órgão das Nações Unidas Para a Agricultura e Alimentação
<b>GD</b>	Graus-Dias
<b>IAF</b>	Índice de Área Foliar
<b>PMP</b>	Ponto de Murcha Permanente
<b>UFAL</b>	Universidade Federal de Alagoas
<b>VCAN</b>	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
<b>ZCIT</b>	Zona de Convergência Intertropical

## RELAÇÃO DE SÍMBOLOS

<b>Acc</b>	Conteúdo de Água na Capacidade de Campo
<b>AL</b>	Armazenamento de Água no Solo
<b>Apm</b>	Conteúdo de Água no Ponto de Murcha Permanente
<b>C</b>	Comprimento
<b>Cp</b>	Calor Específico do Ar Seco
<b>Dpv</b>	Déficit de Pressão de Vapor de Água
<b>Dr</b>	Depleção de Água no Solo
<b>dr</b>	Distância Relativa Terra-sol
<b>ETo</b>	Evapotranspiração de Referencia
<b>ETP</b>	Evapotranspiração Potencial
<b>ETR</b>	Evapotranspiração Real
<b>F</b>	Fator de Forma Para a Folha do Milho
<b>G</b>	Fluxo de Água no Solo
<b>hc</b>	Variação Diária da Altura da Planta
<b>J</b>	Dia Juliano
<b>Kc</b>	Coefficiente da Cultura
<b>Ks</b>	Coefficiente de Redução por Déficit de Água no Solo
<b>L</b>	Máxima Largura
<b>n</b>	Numero de Horas de Brilho do Sol
<b>p</b>	Fração de Água Extraível
<b><math>\rho_a</math></b>	Densidade do Ar
<b>Ra</b>	Total Diário de Radiação Extraterrestre
<b>ra</b>	Resistência Aerodinâmica ao Transporte de Calor e Vapor de Água
<b>rc</b>	Resistência Global da Cultura ao Transporte de Vapor

<b>R<sub>g</sub></b>	Radiação Solar Global
<b>R<sub>n</sub></b>	Saldo de Radiação
<b>R<sub>s</sub></b>	Total Diário da Radiação Solar Incidente na Superfície
<b>R<sub>so</sub></b>	Total Diário da Radiação Incidente na Superfície Terrestre se Estivesse em Condição de Céu Limpo
<b>T<sub>ar</sub></b>	Temperatura do Ar
<b>UR<sub>máx</sub></b>	Umidade Relativa do Ar Máxima
<b>UR<sub>mín</sub></b>	Umidade Relativa do Ar Mínima
<b>W<sub>s</sub></b>	Ângulo Horário ao Nascer do Sol

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTO	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	viii
RELAÇÃO DE ABREVIATURAS	x
RELAÇÃO DE SÍMBOLOS	xi
SUMÁRIO	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Características Edafoclimáticas de Arapiraca-AL	4
2.2. Cultura do Milho	5
2.2.1. Fenologia	7
2.2.2. Exigências Edafoclimáticas	9
2.2.3. Variedade BR 106	13
2.3. Evapotranspiração	14
2.3.1. Evapotranspiração de Referência (ET <sub>o</sub> ) e Potencial (ETP)	15
2.3.2. Evapotranspiração da Cultura (ET <sub>c</sub> ) e Real (ET <sub>R</sub> ) e Coeficiente de Cultura (K <sub>c</sub> )	16
2.3.3. Método de Penman-Monteith	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1. Características da Área Experimental e do Manejo da Cultura	19
3.2. Observações da Cultura	21
	xiii

3.3. Medidas Agrometeorológicas e Fisiológicas	22
3.4. Estimativas da Evapotranspiração	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. Condições Ambientais	32
4.2. Características Biométricas da Cultura	40
4.3. Evapotranspiração Real	42
4.3.1. Método do coeficiente simples	42
4.3.2. Modelo de Penman-Monteith Original	48
5. CONCLUSÃO	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

## 1. INTRODUÇÃO

O milho é largamente utilizado para alimentação humana, animal e como matéria-prima, sendo, atualmente, produzido em todas as regiões do mundo. No Brasil, diversas novas cultivares de milho são desenvolvidas anualmente, a fim de se adequar a cultura a diferentes condições edafoclimáticas. Na safra agrícola de milho 2006/2007 a área plantada no País foi de aproximadamente 13,9 milhões de hectares, com produção estimada de 50,7 milhões de toneladas. A produtividade média de grãos, safra das chuvas, para o mesmo ano agrícola foi da ordem de  $3.900 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

No Nordeste brasileiro (NEB) a maior parte dos cultivos é de subsistência e em sequeiro, com baixos níveis tecnológicos agregados, particularmente nas culturas de milho e feijão. Nessas condições, a cultura do milho apresenta baixos índices de produtividade, em torno de  $1.100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (CONAB, 2007). Tendência análoga é observada para o estado de Alagoas, com baixas produtividades ( $600 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em relação à média nacional. O município de Arapiraca, em cultivos que utilizam níveis médios de tecnologia, apresenta produtividade superior a  $8 \text{ t ha}^{-1}$  (FERREIRA JUNIOR, 2007). Os baixos valores de produtividade, encontrados na literatura, devem-se ao fato dos censos agropecuários utilizarem dados de produtores de forma geral, inclusive aqueles que praticam agricultura de subsistência, com baixos níveis tecnológicos e/ou cultivos consorciados.

O semi-árido nordestino é uma região com irregular distribuição sazonal das chuvas, com o período úmido concentrando entre quatro a cinco meses, o que obriga o agricultor a adotar práticas de manejo, como por exemplo, o uso da cobertura vegetal na entrelinha (mulching) - com objetivo de diminuir a evaporação de água do solo. Para aplicação dessas e de outras práticas, como a irrigação, é necessária a determinação do consumo real de água pela cultura e da disponibilidade de água, a fim de evitar perdas de produtividade, desperdício de recursos, lixiviação de nutrientes, salinização e erosão dos solos, entre outros.

O conhecimento das necessidades reais de água das culturas, nas suas diferentes fases fenológicas, é essencial para se alcançar a produção potencial. A perda de água para atmosfera de uma superfície vegetada ocorre basicamente por dois processos, a evaporação do solo e das superfícies de água livre e a transpiração das plantas. A

ocorrência simultânea desses dois processos é denominada de evapotranspiração – ET (PEREIRA et al., 1997). Determinações de ET podem ser feita por medidas diretas (lisímetria), micrometeorológicas (razão de Bowen e correlação de vórtices turbulentos) e das componentes do balanço de água no solo ou estimada por modelos empíricos (Thornthwaite, Camargo, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, entre outros) e físico-fisiológicos (Penman e Penman-Monteith) em função dos elementos agrometeorológicos e da cultura.

Dentre os modelos, o original de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) destaca-se por sua robusta formulação físico-fisiológica e por apresentar estimativas satisfatórias em diversas condições climáticas, culturas e práticas culturais. Esse modelo é baseado nos processos de transferência de massa e energia entre a superfície vegetal e a atmosfera, representada de forma análoga à lei de Ohm da eletricidade.

Tendo como contexto geral o uso racional da água na agricultura, a expansão e a otimização da cultura do milho no município de Arapiraca/AL, os objetivos desse trabalho são: i) avaliar as estimativas da evapotranspiração real da cultura do milho pelo modelo original de Penman-Monteith, com diferentes sub-modelos da resistência da cultura, e pelo método do Kc único da FAO e ii) determinar as necessidades reais de água da cultura do milho em cada fase fenológica e durante o seu ciclo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Características Edafoclimáticas da Região de Arapiraca-AL**

A região de Arapiraca está localizada na região sudoeste da zona fisiográfica do Agreste de Alagoas. Devido a sua localização geográfica, a região apresenta-se como rota de ligação entre as demais regiões geoeconômicas do Estado e caracteriza-se como pólo de abastecimento agropecuário, comercial, industrial e de serviços. A Capital do Fumo, como é conhecida, Arapiraca apresenta população de 210.521 habitantes distribuídos numa área de 351 km<sup>2</sup> (IBGE, 2001).

O relevo de Arapiraca está compreendido na unidade dos Tabuleiros Costeiros, composta por platôs de origem sedimentares com entalhamentos variáveis. A vegetação é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de Floresta Subcaducifólia e cerrado. Os solos são profundos, de um modo geral, e apresentam baixa fertilidade. São representados pelos Latossolos e Podzólicos nos topos de chapadas e topos residuais; pelos Podzólicos com Fregipan, Podzólicos Plínticos e Podzóis nas pequenas depressões nos tabuleiros; pelos Podzólicos Concrecionários em áreas dissecadas e encostas e Gleissolos e Solos Aluviais nas áreas de várzeas (CPRM, 2005).

O clima da região dos Tabuleiros Costeiros, a qual pertence o município de Arapiraca, é quente e úmido com precipitações anuais entre 500 e 800 mm. O período chuvoso da região se estende da primeira quinzena de abril até a segunda quinzena de agosto e corresponde a 70% da precipitação anual. Assim como as precipitações, as temperaturas do ar nessa época são as que melhor atendem as exigências térmicas das culturas agrícolas, tornando esse período apropriado para o cultivo em regime de sequeiro (SOUZA, 2001).

As precipitações na região leste do Nordeste, onde está inserido o estado de Alagoas, são influenciadas principalmente pela massa de ar tropical marítima e pela ação dos sistemas frontais de origem polar (RATISBONA, 1976; KOUSKY, 1979; OLIVEIRA, 1986; CAVALCANTI et al., 1996). Linhas de instabilidade associadas à brisa marítima e terrestre (COHEN et al., 1995), posição e intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (UVO, 1989), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) (KOUSKY e GAN, 1981) e Ondas de Leste (FERREIRA et al., 1990) são

exemplos de outros sistemas meteorológicos que estão relacionados com a precipitação na região. A variabilidade mensal das precipitações está relacionada com a intensidade da brisa terrestre (KOUSKY, 1980; CAVALCANTI e KOUSKI, 1982).

## 2.2 Cultura do Milho

O milho é um vegetal que pertence ao gênero *Zea* e à espécie *Zea mays L.* É uma gramínea anual pertencente ao grupo de plantas com metabolismo C4 e com ampla adaptação a diferentes ambientes. Sua utilização na alimentação humana remota a séculos, constituindo alimento tradicional da dieta de vários povos, principalmente aqueles que se originaram das civilizações Astecas, Maias e Incas. A evidência mais antiga de milho cultivado nas Américas foi encontrada na caverna de Guilá Naquitz, em Oaxaca, México, e datada em 6.250 anos atrás (PERRY et al., 2006).

A importância econômica do milho é caracterizada pelas diversas formas de sua utilização, que vai desde a alimentação animal até a indústria de alta tecnologia. Apesar de não ter participação significativa no uso de milho em grão, a alimentação humana, com derivados de milho, constitui fator importante de uso desse cereal em regiões com baixa renda. Em algumas situações, o milho constitui a ração diária de alimentação, como por exemplo: na região Nordeste do Brasil, o milho é a fonte de energia para muitas pessoas que vivem no semi-árido; outro exemplo está na população mexicana, que tem no milho o ingrediente básico para sua culinária.

Os Estados Unidos são os maiores produtores, com estimativa de 326,15 milhões de toneladas. A área cultivada pelos americanos na safra 2007/08 foi de 34,57 milhões de hectares. Os EUA respondem por 42 % da produção mundial de milho, seguido pela China (19%), com produção estimada em 148 milhões de toneladas, Brasil (6,4%), com previsão de 50 milhões de toneladas, e Argentina e México (3% cada), empatados com projeção de 24 milhões de toneladas, cada (GARCIA, 2009).

Em 2008, as expectativas para os produtores exportadores de milho são promissoras, uma vez que, os Estados Unidos desejam reduzir o seu consumo de gasolina e estimular o uso de combustíveis “limpos”, que causam menos danos ao meio ambiente do que o petróleo, como o álcool, que pode ser obtido do milho. A medida americana implicará numa redução nas exportações de milho, o que amplia o volume de exportações de outros países, enquadrando-se nesta o Brasil. Aliado a estas

expectativas, o cenário internacional favorável e as boas condições climáticas beneficiam as plantações deste cereal.

O cultivo de milho voltado para o abastecimento da população em algumas regiões do Nordeste brasileiro também é de grande importância, pois constitui a base alimentícia. Não obstante, os trabalhos de pesquisa nesse seguimento são imprescindíveis, os quais vão possibilitar obter o potencial produtivo com melhor custo benefício.

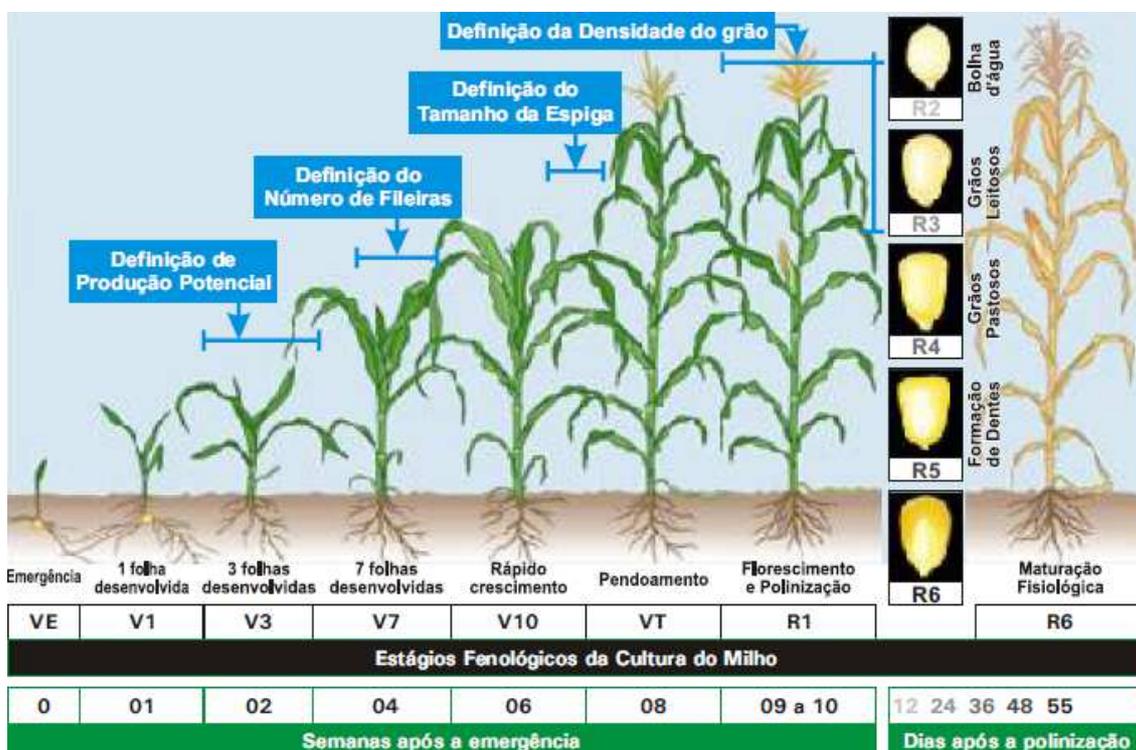
Pesquisas realizadas pela EMBRAPA Tabuleiros Costeiros geraram o comunicado número 40 (CARVALHO et al., 2005), que teve o objetivo mapear as diversas áreas e a melhor adaptação de alguns cultivares a estas áreas. Nesse boletim, por exemplo, a região Agreste - onde se localiza o município de Arapiraca/AL - no qual a base de sustentação familiar é o milho e o feijão, apresenta precipitação pluvial média anual entre 500 e 800 mm, com regularidade climática – períodos chuvosos e secos bem definidos, com probabilidade de 75% de períodos decendiais com 20 mm de precipitação - o que garante probabilidade menor de frustrações climática; o que não se espera no sertão, onde o regime pluvial é inconstante – decêndios têm chuva abaixo de 20 mm com 75% de probabilidade (CARDIM, 2003).

### **2.2.1 Fenologia**

Os dois principais fatores ambientais que influenciam a fenologia do milho são a disponibilidade térmica e a radiação solar, sendo que a primeira explica melhor a duração dos seus períodos de desenvolvimento. Considera-se uma relação linear entre a duração desses períodos e o desenvolvimento da planta (LOZADA et al., 1999). Por isso, a escolha da melhor época de plantio - aquela que faz coincidir a maior área foliar por planta com os dias mais longos do ano, quando não há limitação hídrica – é importante para produção potencial de grãos por planta (SILVA & ARGENTA, 2000). Semeadura precoce implica redução da taxa de crescimento e aumento dos subperíodos de desenvolvimento, sendo observado o inverso com a semeadura tardia (NOLDIN, 1985).

Na Figura 1 estão dispostos os estádios fenológicos da cultura do milho, assim como, algumas definições de parâmetros considerados importantes, como por exemplo,

a definição da quantidade de folhas e espigas produzidas (produção potencial) que ocorre na fase V3 – 3 folhas completamente desenvolvidas.



**Figura 1.** Fenologia do milho: estádios de desenvolvimento da cultura. Adaptado de Fancelli (1986) e Iowa State University Extension (1993).

A fase VE ocorre entre 4 e 5 dias após a sementeira e é nessa que é determinado o número de plantas por hectare. Nos estádios V6 (6 folhas totalmente desenvolvidas) e V8 (8 folhas totalmente desenvolvidas) – conhecidos também como estágio do “cartuxo” - o déficit de água acarretará em perdas profundas para a cultura, como por exemplo, afinamento do colmo, diminuição do porte das plantas e da área foliar. Contudo, é nessa fase que a cultura apresenta sua máxima tolerância ao estresse hídrico e uma maior vulnerabilidade a variações bruscas de temperatura. Entre os estádios V9 e V10 ocorre a formação de várias espigas, mas aproximadamente duas conseguem atingir o crescimento completo. Os órgãos florais e o pendão possuem rápido desenvolvimento e a elongação do caule continua. Logo após o estágio V10, a distância entre os estádios foliares irá decrescer de quatro para três ou dois dias. No estágio V12 ocorre o desenvolvimento das raízes adventícias (“esporões”) e a planta já possui aproximadamente 90% de sua área total. A deficiência hídrica nessa fase pode afetar o

número potencial de sementes e o tamanho das espigas a serem colhidas. Entre os estádios V15 e V17 inicia-se o crescimento dos Estilos-estigmas (“cabelos”). Aproximadamente há uma semana do florescimento, no estádio V18, a ocorrência de estresse hídrico severo poderá provocar a não formação do grão de milho, afetando assim o rendimento. O pendoamento, estádio de máximo crescimento e desenvolvimento, caracteriza-se pelo total aparecimento do pendão (inflorescência masculina) e da não emergência dos cabelos nas espigas.

Em condições ambientais ótimas para o desenvolvimento da cultura, cada cabelo deve emergir, polinizar e originar um grão. Os estádios de grãos iniciam-se com este na forma de bolha d’água (Estádio R2), na qual a espiga está próxima de atingir seu tamanho máximo e os grãos estão com 85% de umidade. A densidade de grãos e um rápido acúmulo de matéria seca é definida na fase de grão-leitoso (Estádio R3) e estes se encontram com 80% de umidade. O próximo estádio é o de grão-pastoso (Estádio R4), nesse, os grãos reduzem a umidade para 70%. No estádio R5, aproximadamente 36 dias após o início da polinização, os grãos apresentam uma concavidade na parte superior, designada “dente”. Nessa fase, condições ambientais desfavoráveis ao desenvolvimento da cultura podem causar confusão na indicação da maturidade fisiológica e resultar em redução da produção. Os grãos apresentam cerca de 55% de umidade nessa fase. Finalmente, após 50 a 60 dias a polinização, é alcançado o estádio de maturação fisiológica, na qual, todos os grãos na espiga atingem o máximo peso seco e vigor. Nessa fase, cessa o acúmulo de matéria seca nos grãos e inicia-se o processo de senescência natural das folhas. A umidade dos grãos nessa fase varia de 30 a 38%, umidade esta, que ainda não é a ideal para a colheita e armazenagem dos grãos; o ideal seria os grãos atingirem entre 13 e 15% de umidade. Uma forma alternativa da colheita com a umidade relativamente alta, de 18 a 25%, seria a secagem artificial dos grãos antes de serem armazenados (WEISMANN, 2008).

### **2.2.2 Exigências Edafoclimáticas**

O clima e o solo definem fatores ambientais essenciais a vida dos vegetais. As plantas necessitam de radiação solar para o processo fotossintético, de água para regular a temperatura das folhas, da evapotranspiração na troca de vapor d’água com a atmosfera e da assimilação pelas raízes para manter o transporte de nutrientes e assim,

seu crescimento. Todas as culturas apresentam faixas ótimas dos fatores edafoclimáticos para alcançar desenvolvimento e produtividade potencial.

A cultura do milho é influenciada por todos os fatores climáticos, entretanto, a radiação solar, a precipitação pluvial e a temperatura do ar são os principais, pois atuam eficientemente nas atividades fisiológicas e influenciam diretamente na produção de grãos e de matéria seca. No Brasil, devido a sua diversidade climática, a região na qual o cultivo será implantado dirá quais os fatores que irão influenciar a estação de crescimento. Na região central, por exemplo, a precipitação tem papel de destaque, inclusive afeta indiretamente o regime de radiação, pois altas chuvas implicam na baixa radiação solar que chega à superfície, em função da elevada nebulosidade associada. Nas regiões temperadas e subtropicais, a limitação maior se deve à temperatura do ar e a radiação solar, sendo os limites extremos variáveis com microrregiões agroclimáticas (SANS e SANTANA, 2002).

### **Características Físicas do Solo**

Os solos recomendados para o cultivo do milho são os de textura média, com teores de argila em torno de 30-35%, ou mesmo argilosos, estruturados, como os latossolos, que possibilitam drenagem adequada, apresentam boa capacidade de retenção de água e de nutrientes disponíveis às plantas. Já os solos arenosos, com teor de argila inferior a 15%, e os com tipo de argila expansiva, tipo montmorilonita, não são recomendados. Os primeiros apresentam baixa capacidade de retenção de água e de nutrientes, intensa lixiviação e grande perda de água por evaporação. Enquanto, o tipo argila expansiva apresenta forte agregação, prejudicando as condições de permeabilidade e a livre penetração do sistema radicular (MATOS, 2007).

O milho é uma cultura que tem sistema radicular com elevada capacidade de crescimento, necessitando de solos profundos - aproximadamente 1,0m, sem impedimentos físicos ou químicos. Essa profundidade também oferece outros benefícios, como por exemplo, maior capacidade de armazenamento e desgaste lento por conta da maior espessura do perfil. A profundidade efetiva de raízes raramente ultrapassa 0,30 m em regiões tropicais, podendo ir até abaixo de 1,0m em regiões de clima temperado (SAAD, 1991).

## Temperatura do Ar

A influência da temperatura do ar se destaca nos processos fisiológicos das plantas, sobretudo na definição dos subperíodos do ciclo dos vegetais. A utilização da temperatura média do ar, numa escala diária, é boa estimativa da quantidade de energia química metabólica produzida pelo material genético (GADIOLI et al., 2000). Além disso, as plantas apresentam temperatura mínima abaixo da qual interrompem as suas atividades fisiológicas e faixa satisfatória de temperatura para o seu desenvolvimento adequado (BARBANO et al., 2001). Segundo Warrington & Anthesis, (1983) a faixa térmica ótima para o desenvolvimento e crescimento do milho é de 10 a 30°C. Fancelli (2001), afirma que, em geral, as temperaturas do ar ótimas para o crescimento de milho variam entre 25 e 30°C, enquanto as temperaturas mínimas entre 6 a 8°C.

A temperatura do solo também exerce influência significativa nas atividades fisiológicas. Quando a temperatura do solo é inferior a 10°C e superior a 42°C há prejuízo sensível à germinação e que o ideal seria entre 25 e 30 °C (Fancelli & Dourado Neto, 2000). As temperaturas subsuperficiais também têm importância relevante para a cultura do milho. Temperaturas subsuperficiais em torno de 29,3°C favorecem a ocorrência da emergência em cinco dias (BARRETO et al., 2000).

A disponibilidade térmica influencia diretamente o desenvolvimento fenológico das plantas. Em locais ou períodos mais quentes (frios), por exemplo, o desenvolvimento dos estádios fenológicos, e conseqüentemente o ciclo total, são mais rápidos (lentos) devido ao maior (menor) acúmulo térmico.

A cultura de milho necessita de acúmulo distinto de energia térmica ou calor em função da temperatura do ar, denominada Unidades Térmicas ou Graus-dia (GD), para que a planta possa atingir determinado estágio fenológico. Existe uma temperatura base acima da qual a cultura inicia o seu processo de acúmulo térmico. A temperatura base varia para cada espécie vegetal ou variedade em função da idade ou da fase fenológica da planta. Para facilitar a aplicação, é comum adotar uma única temperatura base para todo ciclo da planta (GADIOLI et al., 2000). Nos estudos desenvolvidos no Brasil a temperatura base utilizada é a recomendada por Berlato & Matzenauer (1986) de 10°C.

Estudos realizados por Barreto et al (2001) mostram que o milho necessitou de 1.522GD para completar todo o seu ciclo fenológico, sendo que, a ocorrência do estágio 03, doze folhas, foi a que exigiu o maior acúmulo, com 285,88GD. Enquanto, o estágio

05, florescimento e polinização, necessitaram de apenas 51,73GD para sua ocorrência. Na região do Semi-Árido do Sub-médio do São Francisco, num cultivo de milho consorciado com feijão-caupi, constatou-se que a quantidade de acúmulo térmico para a realização do ciclo do milho foi de 1.866 GD com duração de 103 dias, já para o feijão foi de 1.442 GD com duração de 78 dias - colheita de grãos secos (SOUZA et al., 2007).

### **Eficiência no Uso da Radiação**

Por pertencer ao grupo de plantas C4, o milho apresenta taxa fotossintética elevada, respondendo com elevados rendimentos ao aumento da intensidade luminosa. Devido à anatomia da sua folha, com arquitetura que minimiza a perda de CO<sub>2</sub>, o milho é uma planta que apresenta ótima eficiência no uso da radiação solar (BERGAMASCHI et al., 2004). A maior sensibilidade à variação de radiação ocorre no início da fase produtiva, ou seja, nos primeiros 15 dias após o pendoamento, densidade dos grãos. Uma redução de 30 a 40% da intensidade luminosa ocasiona atraso na maturação dos grãos, principalmente em cultivares tardias, que se mostram mais carentes de luz. Já a maior sensibilidade à variação de luz ocorre no início da fase reprodutiva. O aproveitamento efetivo de luz pelo milho depende muito da estrutura da planta, principalmente da distribuição espacial das folhas. Pesquisas realizadas pela Embrapa (2009) com mais de 200 cultivares de milho indicaram que a densidade recomendada pode variar de 40.000 a 70.000 plantas por hectare.

A eficiência no uso da radiação (EUR) é um parâmetro independente e utilizado para verifica o desempenho das culturas e verificar possíveis limitações na produtividade (Medeiros et al., 2009). Quando não há restrição hídrico/mineral a EUR é descrita por uma relação linear entre a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura e o acúmulo de matéria seca (MS) (MONTEITH, 1977).

Dados de um cultivo de milho no agreste alagoano, sob diferentes coberturas de solo (plástico, cobertura morta e solo nu na entrelinha), mostram que EUR variou entre 3,0 e 4,2 g MS MJ<sup>-1</sup> (FERREIRA JUNIOR et al., 2007). O autor encontrou correlações satisfatórias em todos os tratamentos, sendo os valores de UER similar aos encontrados em outras pesquisas com a mesma cultura. As plantas de milho cultivadas em solo com cobertura de plástico apresentaram EUR superior as dos outros tratamentos.

## Necessidade de água

O milho, por razões principalmente econômicas, é plantado na maioria das regiões, no período úmido, sem irrigação, ou seja, é uma cultura típica de sequeiro. Portanto, conhecer suas necessidades de água, como sua evapotranspiração, e as condições locais para suprir essa demanda, como a magnitude e frequência local das chuvas, associada ao número de dias secos na estação de cultivo são essenciais. A produtividade potencial ocorre quando o consumo de água durante todo o ciclo está entre 500 e 800mm (REICHARDT, 1987), e que a cultura exige mínimo de 350-500mm para que produza sem necessidade de irrigação. Para a cultura do milho, em condições de clima quente e seco, o consumo de água raramente excede 3,0mm d<sup>-1</sup>, quando a planta apresenta em torno de 0,30m de altura e, no período que vai da iniciação floral a maturação, pode atingir valores de 5 a 7mm d<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2009).

A eficiência do uso da água para a produção de grãos varia entre diferentes cultivares de milho e também em função da umidade do solo (MTUI et al., 1981). Os cultivares irrigados apresentaram eficiência do uso da água entre 0,45 e 1,21g m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>, com média de 0,81g m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>, enquanto os não irrigados apresentaram variações entre 0,31 a 1,25g m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup> com média de 0,77g m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>. Os autores observaram que os híbridos são mais eficientes na utilização e conversão da água absorvida.

### 2.2.3 Variedade BR 106

A BR 106 é uma variedade desenvolvida pela EMBRAPA, e comercializada desde 1985. Desde o início da sua comercialização, a variedade passou por melhorias genéticas a cada ano, a fim de se alcançar principalmente a melhoria na produção de grãos. Uma das principais características dessa variedade é a sua adaptabilidade a todas as regiões brasileiras. Aliadas a esta, a BR106 apresenta porte (2,40m) e ciclo intermediário (130 dias), resistência ao acamamento e ao ataque das principais pragas, tais como, lagarta elasmô, *Elasmopalpus lignosellus*; percevejo barriga verde, *Dichelops* spp.; lagarta do cartucho, *Spodoptera frugiperda*; lagarta rosca, *Agrotis ipsilon* e lagarta da espiga, *Helicoverpa zea* (BIANCO, 1991). A Tabela 1 apresenta as características agrônômicas da variedade BR106.

**Tabela 1.** Características agronômicas da variedade de milho BR106.

---

<u>Ciclo</u>	
Florecimento	65 dias
Maturação	35 dias
Altura da planta	240 cm
Altura da espiga	135 cm
<u>Grãos</u>	
Cor	Amarelo-ouro
Tipo	Sedimentado
Empalhamento	Muito bom
Tolerância ao acamamento	Muito bom
Tolerância ao quebramento	Muito bom
Produtividade média	5.500 kg/ha
Adaptação	Todas as regiões do Brasil

---

**Fonte:** Embrapa Milho e Sorgo, 2004.

### 2.3 Evapotranspiração

Evapotranspiração é o termo utilizado para se denominar a ocorrência conjunta dos processos de evaporação de água do solo e das superfícies de água livre e da transpiração das plantas. O conhecimento da demanda hídrica de determinada cultura é informação imprescindível para o planejamento do manejo da cultura.

Medições diretas da evapotranspiração são difíceis e dispendiosas, uma vez que exigem instalações adequadas, equipamentos específicos e profissionais qualificados. Portanto, medidas diretas de evapotranspiração normalmente são obtidas em condições experimentais, as quais subsidiam soluções práticas para obtenção desta em condições de campo. Como métodos diretos, podemos citar os que utilizam lisímetros, controle de umidade no solo, entre outros. Já os métodos indiretos implicam no uso de modelos empíricos ou físico-fisiológicos.

A evapotranspiração de um cultivo é parâmetro controlado por variações de fatores edafoclimáticos, pelo estado fitossanitário da planta e pelas condições de salinidade do solo. Com relação às condições hídricas as quais as culturas estão impostas a evapotranspiração pode se classificada em potencial (ETP) ou real (ETR). A

evapotranspiração potencial é a perda máxima de água para atmosfera, em forma de vapor, que ocorre em uma vegetação em pleno crescimento e sem restrições hídricas. Já a evapotranspiração real, é aquela que ocorre em qualquer cultura, em qualquer estágio fenológico, sob condições ou não de limitação hídrica ou outro fator que impeça a sua taxa potencial.

### **2.3.1 Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) e Potencial (ETP)**

Definiu-se, para fins de estimativa do consumo de água pelas plantas, para estudos climáticos e padronizações, a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e a potencial (ETP) – que é aquela que ocorre em uma cultura hipotética, no caso de ET<sub>o</sub> ou na grama ou alfafa na definição de ETP. Os conceitos de ET<sub>o</sub> ou ETP consideram a evapotranspiração de uma superfície extensa coberta com cultura similar a grama, ou alfafa, em alguns casos, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo completamente a superfície do solo, em ótimo estado fitossanitário e sem restrição hídrica. A ET<sub>o</sub> ou ETP, devido as considerações para sua definição apresentam-se como um índice de demanda climática.

A obtenção dos valores de ET<sub>o</sub> e, ou ETP pode ser feita por diversos métodos como, por exemplo, o do Tanque classe A, Hargreaves, Linacre, Thornthwaite e Penman-Monteith. O uso desses métodos depende da disponibilidade de dados agrometeorológicos na região de estudo. A acurácia dos métodos varia de acordo com a região de estudo. Determinado método pode apresentar valores próximos do real para uma região, com suas respectivas características climáticas, e esse mesmo método, quando aplicado a outra região de estudo, pode não ter boa correlação com os dados reais.

A FAO, no boletim de irrigação e drenagem nº 56 (ALLEN et al., 1998), adotou o modelo de Penman-Monteith parametrizado para uma cultura hipotética como padrão para o cálculo da ET<sub>o</sub>. O método Penman-Monteith parametrizado pela FAO apresenta boa acurácia em diversas condições climáticas nas escalas de tempo horária e diária, ou superior (SANTIAGO, 2001). O método considera uma cultura hipotética, com características similares a grama, e aproximadamente 0,12 m de altura, resistência da superfície do dossel ( $r_s$ ) de  $70 \text{ s.m}^{-1}$  e albedo de 0,23.

### **2.3.2 Evapotranspiração da Cultura (ET<sub>c</sub>) e Real (ET<sub>R</sub>) e Coeficiente de Cultura (K<sub>c</sub>)**

A evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) representa a taxa de água consumida por determinada cultura em condições ótimas de água no solo. ET<sub>c</sub> pode-se ser determinada por medidas diretas (lisímetros), métodos micrometeorológicos (razão de Bowen e Correlação de Turbilhões), como resíduo do balanço de água no solo ou por modelos empíricos (Linacre, Thornthwaite, Camargo, entre outros) ou semi-empíricos (Penman e Penman-Monteith) (PEREIRA et al., 1997).

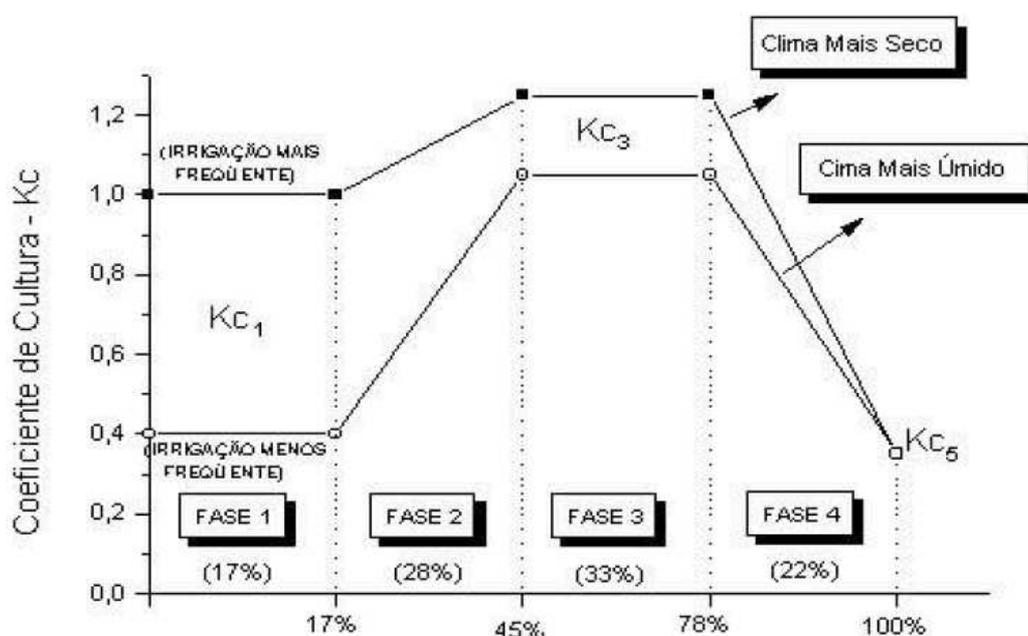
Medidas diretas de ET<sub>c</sub> ou sua determinação por métodos micrometeorológicos normalmente se restringem a áreas experimentais de pesquisa, função das dificuldades associadas a esses métodos, tais como, custo de implantação e de sensores e disponibilidade de pessoal qualificado. As estimativas baseadas no balanço de água no solo consideram medidas pontuais e de difícil extrapolação para áreas extensas, função da elevada variabilidade das características físicas do solo. Assim, os modelos empíricos e semi-empíricos se apresentam como alternativa prática e simples para as estimativas das necessidades de água das culturas.

Entre os modelos, o de Penman-Monteith se destaca pela robusta representação físico-fisiológica do processo de transporte de água no sistema planta-solo-atmosfera. Contudo, para aplicação do modelo é necessário a determinação da resistência global ao transporte de vapor d'água da cobertura vegetal e do solo ( $r_c$ ) e da resistência aerodinâmica ao transporte de calor e massa (vapor H<sub>2</sub>O). Essas resistências variam para cada cultura e estágio de desenvolvimento e em função das condições ambientais (umidade e temperatura do ar, velocidade do vento e radiação solar).

A ET<sub>c</sub> pode ser obtida pelo produto entre o consumo de água de uma cultura de referência – evapotranspiração de referência e o coeficiente da cultura. ET<sub>o</sub> representa a demanda climática, sendo estimada com dados climáticos locais, enquanto K<sub>c</sub> incorpora as características de determinada cultura que a diferenciam da cultura de referência. O coeficiente de cultivo reflete a necessidade hídrica da cultura e seu valor varia conforme o estágio vegetativo. K<sub>c</sub> é um dos parâmetros que interferem na lâmina de água aplicada às culturas agrícolas, e quando regionalizado em função das condições climáticas de cada localidade, pode contribuir para minimizar o desperdício de água na agricultura (DOORENBOS & PRUITT, 1977). Os valores de K<sub>c</sub> variam de acordo com o método adotado para o cálculo da ET<sub>o</sub>. O boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998) apresenta

valores de  $K_c$  tabelados para diversas culturas. Esses valores são fornecidos para condições padrões e ajustadas em função das condições de vento, da umidade relativa do ar e edáficas do local de cultivo. Entretanto, há dificuldades de obtê-los em situações cujos dados climáticos não são facilmente disponíveis.

Para a cultura do milho, a circular técnico de número 85 do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, apresenta a Figura 2, a qual reporta os valores de  $K_c$  de acordo com o tempo. O milho por ser uma cultura de ciclo curto (120 a 180 dias) tem o seu estágio de desenvolvimento dividido em quatro fases para a interpolação do  $K_c$  com o tempo. As fases 1 (inicial), 2 (crescimento), 3 (intermediário) e 4 (final) correspondem a respectivamente 17%, 28%, 33% e 22% do ciclo total do milho.



**Figura 2.** Valores de  $K_c$  para milho nas diferentes fases do ciclo e condições climáticas (ANDRADE, 2006).

O solo é um reservatório ativo de água, assim, à medida que a água é consumida no processo de evapotranspiração torna-se mais difícil sua retirada do solo, em função do aumento do seu potencial matricial. Alguns autores (THORNTHWAITE e MATHER, 1955) consideram que abaixo da água na capacidade de campo ( $A_{cc}$ ) a evapotranspiração é penalizada, sendo denominada de evapotranspiração real (ETR). A evapotranspiração real representa o consumo de água pela cultura em qualquer condição de água no solo, ou seja, com conteúdo de água no solo entre a capacidade de água disponível ( $CAD = A_{cc} - A_{pm}$ ), em que  $A_{pm}$  é o conteúdo de água no ponto de murcha

permanente. Assim, quando o conteúdo de água no solo for igual à  $A_{cc}$ ,  $ET_c = ETR$  (condição potencial); caso o conteúdo seja inferior a  $A_{cc}$ , a evapotranspiração é denominada de real e  $ETR < ET_c$ . Outros autores (Allen et al., 1998) consideram que apenas abaixo da água facilmente disponível ( $AFD = f CAD$ ) as taxas de evapotranspiração são penalizadas. No caso do boletim FAO-56 (Allen et al., 1998), a evapotranspiração em qualquer condição hídrica é também denominada de evapotranspiração real. Contudo, quando o conteúdo de água no solo está entre a AFD,  $ET_c = ETR$  (condição potencial), e apenas se o conteúdo for menor que AFD,  $ETR < ET_c$ . Para representar esses processos pode-se incluir um coeficiente de redução por déficit de água no solo ( $K_s$ ) ao produto  $ET_c = ET_o K_c$  para se obter  $ETR = ET_o K_c K_s$ .

### **2.3.3 Método de Penman-Monteith**

O modelo de Penman-Monteith é adotado como método padrão pela FAO para a determinação da evapotranspiração de referência, por conciliar diversos efeitos considerados importantes, como componentes do balanço de energia, poder evaporante do ar e resistência estomática da cultura. Monteith (1965), tendo como base a equação de Penman, 1948, desenvolveu um modelo que concilia os aspectos aerodinâmicos, termodinâmicos, resistência do ar ao fluxo de calor sensível e vapor d'água ( $r_a$ ) e a resistência da superfície vegetada à transferência de vapor d'água para a atmosfera ( $r_c$ ).

O uso do método de Penman-Monteith é ponderado pela dificuldade de se medir as resistências, as quais são de difícil obtenção em cultivos comerciais e exigem sensores específicos. Diante do problema exposto, algumas alternativas surgiram, como a apresentada por Ortega-Farias (1993). Ortega-Farias desenvolveu um método para obter a resistência da superfície vegetada no qual são usadas variáveis comumente medidas nos postos agrometeorológicos (temperatura e umidade do ar e radiação solar global). Outra alternativa, para o uso prático do método de Penman-Monteith foi sugerido pela FAO (ALLEN et al., 1998), sendo denominado de “método do  $K_c$  único”. Esse método consiste em dividir o processo de obtenção da ET em dois passos. No primeiro passo é obtido a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), obtida pelo Método de Penman-Monteith com as resistências parametrizadas. No segundo passo, a  $ET_o$  é multiplicada por um fator que representa as características da cultura denominado de

coeficiente de cultura ( $K_c$ ), e finalmente, pelo produto de  $ET_0 \cdot K_c$ , obtêm-se a evapotranspiração da cultura (ALLEN et al., 1998; LYRA et al., 2007).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Características da Área Experimental e do Manejo da Cultura

O experimento foi realizado na Vila São José, localizada no município de Arapiraca, Alagoas (09° 38' 35,3" S; 36° 40' 15,5" W; 260 m). A área experimental foi de aproximadamente 6.120 m<sup>2</sup>, com 60 ha de cultivos comerciais de milho no seu entorno (Figura 3).

O plantio foi realizado em 04/06/05, no espaçamento 0,80 m entre linhas e 0,20 m entre plantas, resultando num “stand” de 62.500 plantas por ha. As linhas foram dispostas no sentido SW-NE. O cultivo foi em regime de sequeiro, uma vez que a maior parte do experimento foi conduzido no período chuvoso da região. A variedade cultivada foi a BR 106, desenvolvida pela EMBRAPA.



**Figura 3.** Área experimental com a cultura de milho, Vila São José, Arapiraca - Alagoas em 2005.

A análise granulométrica do perfil do solo de 0 a 0,6 m, realizada a cada 0,1 m de profundidade, caracterizou o solo como de textura média, solo franco argilo-arenoso (Tabela 2). A declividade média da área foi de 5 %. No manejo nutricional realizou-se a

adubação de plantio, baseado na análise química (Tabela 3) e segundo as recomendações de Cruz et al. (1996), utilizando 30 kg de N ha<sup>-1</sup>, 66 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> e 36 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. Foram feitas duas adubações nitrogenadas de cobertura com 100 kg de uréia ha<sup>-1</sup> aos 21 e 42 dias após o plantio. O solo foi preparado com duas gradagens, realizadas com grade aradora pesada de duas seções de 12 discos. O controle de plantas daninhas foi feito com a aplicação de um herbicida de pré-emergência e uma capina manual do decorrer do ciclo.

**Tabela 2.** Análise granulométrica (física) e classificação textural do solo da área experimental<sup>1</sup>

	0-10cm	10-20cm	20-30cm	30-40cm	40-50cm	50-60cm
Areia grossa (%)	44	41	38	36	34	31
Areia fina (%)	7	22	10	27	6	28
Silte (%)	28	10	30	20	48	28
Argila (%)	21	27	22	17	12	13
Silte / Argila	1,33	0,37	1,36	1,18	4,00	2,15
Densidade do solo (g/cm <sup>3</sup> )	1,37	1,56	1,57	1,52	1,48	1,50
Dens. das partículas (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
Porosidade total (%)	58	60	60	59	62	61
Classificação Textural*	<b>Franco Argilo Arenosa</b>	<b>Franco Arenoso</b>	<b>Franco Argilo Arenosa</b>	<b>Franco Arenoso</b>	<b>Argila</b>	<b>Franco Argilo Arenosa</b>

<sup>1</sup> Laboratório de Solo, Água e Energia - Centro de Ciências Agrárias – CECA / UFAL

<sup>2</sup> Classificação com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SBCS)

**Tabela 3.** Resultado da análise química do solo<sup>1\*</sup>.

Prof. (cm)	Ph	P (mg.dm <sup>-3</sup> )	K	Mg	Ca	SB (cmolc.dm <sup>-3</sup> )	Al	H+Al	T	M	V (%)
0-20	5,3	31	187	1,4	3,3	3,87	0,32	3,7	7,53	7,75	50,45

Profundidade (Prof.), Potencial de Hidrogenação (ph), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma das bases (SB), alumínio (Al), hidrogênio mais alumínio (H+Al), capacidade de troca de bases (T), saturação por alumínio (m), saturação por bases (v).

<sup>1</sup> Central Analítica Ltda.

### 3.2 Observações Biométricas e Fisiológicas da Cultura

Semanalmente foram amostradas dez plantas aleatoriamente para análise da máxima largura (L) e comprimento (C) de todas as folhas. A área foliar de cada folha

foi determinada pelo produto,  $C \times L \times f$ , em que  $f$  é o fator de forma para a folha de milho ( $f = 0,75$ ) (MONTGOMERY, 1911; MADDONNI & OTEGUI, 1996). Para o cálculo do índice de área foliar, inicialmente foi calculada a área foliar de cada planta, determinada como o somatório das áreas de todas as suas folhas. Posteriormente foi calculada a média da área foliar por planta, e esta foi então multiplicada pelo número de plantas por hectare. Finalmente o produto foi dividido por  $10.000\text{m}^2$ , resultando assim, no valor do IAF.

A variação do IAF no ciclo da cultura foi obtida pela a equação de Boltzmann. A equação foi ajustada as observações do IAF em função dos dias após o plantio (DAP), definida como:

$$IAF = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(X-X_0)/dx}} + A_2 \quad (1)$$

em que, IAF é o índice de área foliar ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ ),  $A_1$  é o IAF mínimo,  $A_2$  é o IAF máximo,  $X$  é o DAP,  $X_0$  é o valor central do DAP, e  $dx$  é a faixa do DAP onde os valores de IAF mudam drasticamente.

A variação diária da altura da planta ( $h_c$ ) foi estimada por uma equação sigmóide de Boltzmann, similar a eq. 1, ajustada pelas medidas semanais dessa variável em função dos dias após o plantio.

Durante o ciclo da cultura, foram realizadas quatro campanhas de medidas de campo da condutância estomática ( $g_s'$ ,  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com um analisador de gases ao infravermelho portátil (IRGA, ADC, modelo LCI, Hoddesdom). As campanhas foram em 09 e 27/07/05 e 06 e 27/08/05, em todas as campanhas as medidas foram feitas entre 09:00 e 12:00 horário local (Endres, 2010). A cada horário foram amostrados em torno de seis folhas, completamente expandidas. A resistência estomática ( $r_s$ ;  $\text{s m}^{-1}$ ) a difusão de vapor d'água foi determinada pelo inverso da condutância estomática ( $g_s$ ;  $\text{m s}^{-1}$ ), estimada por:

$$g_s = g_s' \frac{R T_{ar}}{P_{atm}} \quad (3)$$

em que,  $R$  a constante universal dos gases ideais ( $8,3143 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $T_{ar}$  a temperatura do ar (K) e  $P_{atm}$  a pressão atmosférica (kPa).

Posteriormente foi aplicada análise de variância (ANOVA) para avaliar se as resistências estomáticas apresentaram diferenças estatísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre os horários e dias. As resistências não apresentaram diferenças significativas e, assim, utilizou, na modelagem da resistência da cultura ( $r_c$ ) do modelo de Penman-Monteith, a resistência estomática média parametrizada pelo índice de área foliar.

### **3.3 Medidas Agrometeorológicas**

Na parte central da área experimental foi instalada uma estação meteorológica automática que coletava, através de sensores automáticos, as variáveis ambientais (Figura 4). A temperatura e a umidade do ar foram medidas por um termohigrômetro (HMP45C, Campbell Scientific, Utah) a uma altura de 2,0m do solo, a precipitação pluvial foi obtida por um pluviômetro automático (TB3, Hydrological Services PTY. LTD., Sydney), instalado a 1,5m acima da superfície do solo, e a radiação solar global ( $R_g$ ) foi medida por um piranômetro (CM3, KIPP & ZONEN, Netherlands). A velocidade do vento foi obtida por um anemômetro de conchas automático (03101-L, Young, Michigan), a uma altura de 2,0m do solo. As medidas foram realizadas em intervalos de 10 segundos e suas médias armazenadas a cada 10 minutos com auxílio de um sistema de aquisição automática de dados (CR10X, Campbell Scientific, Utah). Além das médias, armazenaram-se os extremos diários (máximo e mínimo) da temperatura e umidade do ar.



**Figura 4.** Estação Meteorológica Automática situada no centro do experimento de milho em Arapiraca/Alagoas.

O saldo de radiação diário ( $R_n$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) para a cultura do milho foi obtido em função de  $R_g$ , pela equação  $R_n = 0,789 R_g - 0,7714$ , similar a obtida nos trabalhos de Souza (2001). Essa equação foi determinada pelo ajuste de uma regressão linear entre os dados de radiação solar global e saldo de radiação de dois cultivos de milho realizados em 2000 (sequeiro) e 2002 (irrigado) na estação experimental do Centro de Ciências Agrárias (CECA), pertencente à Universidade Federal de Alagoas (UFAL). A equação apresentou ajuste elevado, com coeficiente de regressão  $R^2 = 0,981$ . O cultivar de milho utilizado nos dois anos foi o mesmo avaliado no presente trabalho BR 106.

A umidade volumétrica do solo foi estimada pela equação de Van Genuchten (1982):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \Psi_m)^n\right]^b} \quad (2)$$

em que,  $\psi_m$  é o potencial matricial de água (Pa) no solo, obtido por um sensor automático de potencial de água no solo (257-L, Campbell Scientific, Utah),  $\theta_r$  ( $m^3 m^{-3}$ ) é a umidade residual do solo,  $\theta_s$  ( $m^3 m^{-3}$ ) é a umidade do solo saturado,  $\alpha$ ,  $n$  e  $b$  são parâmetros ajustados as características edáficas locais.

Os parâmetros ( $\alpha$ ,  $n$  e  $b$ ) da equação de Van Genuchten, para as condições locais, foram determinados pelo ajuste do modelo e medidas de campo. No ajuste considerou-se a umidade volumétrica do solo, obtida por reflectômetros de conteúdo de água no solo; e do potencial de água no solo, medida por um sensor de potencial de água no solo do mesmo modelo usado durante o período experimental. Essas medidas foram obtidas no solo da área experimental e nas mesmas profundidades avaliadas durante o cultivo. Os valores de  $\alpha$ ,  $n$  e  $b$  foram 0,0169; 0,574 e 25,604 respectivamente, para coeficiente de determinação do ajuste do modelo de 0,97 (LYRA et al., 2010). As medidas do potencial e, ou do reflectômetro, no período de ajuste e durante o experimento, foram realizadas a cada 10 segundos, sendo suas médias armazenadas a cada hora com o auxílio de um sistema automático de aquisição de dados (CR10X, Campbell Scientific, Logan, Utah).

O armazenamento de água no solo (AL) foi obtido pelo produto entre a média do conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ) e a profundidade efetiva do sistema radicular (0,30m). A variação do armazenamento de água no solo foi obtida para períodos de 24 horas, considerando o intervalo entre 0:00 e 23:00h. A água disponível (AD) no solo, foi determinada pela diferença entre o armazenamento de água na capacidade de campo (CC) e o armazenamento no ponto de murcha permanente (PMP). O CC (52,9mm) foi obtido para dois dias sem chuva após um período consecutivo de sete dias de chuva (total de 99,3mm) e o PMP (19,6mm) foi determinado após um período de 20 dias sem chuva, por aproximação aos critérios descritos por Reichardt (1987). A água facilmente disponível (AFD) para a cultura do milho correspondeu a 55% da AD (ALLEN et al., 1998).

### **3.4. Estimativas da Evapotranspiração Real**

A Evapotranspiração Real foi obtida por três métodos para avaliar as melhores estimativas para as condições edafoclimáticas locais para a cultura do milho. Isso proporcionará a determinação das necessidades hídricas reais da cultura do milho, e

assim, subsidiará estratégias de irrigação com eficácia e determinará melhores épocas de plantio para a região. Os métodos avaliados são os descritos abaixo:

#### 1. Método do Balanço de Água no Solo - ETR

Na determinação da ETR por esse método foram selecionados os dias que obedeceram aos seguintes critérios:

- a) para  $IAF < 1,44$ , dias com precipitação pluvial inferior a 0,5 mm, ou;  
para  $1,44 \leq IAF \leq 2,88$ , dias com precipitação pluvial inferior a 1 mm ou;  
para  $IAF > 2,88$ , dias com precipitação pluvial inferior a 2 mm;
- b) quando a umidade volumétrica solo foi inferior a umidade na capacidade de campo ( $\theta_i < \theta_{cc}$ ), ou seja, para o conteúdo de água no solo na faixa da AD.

Em que,  $\theta_i$  ( $m^3m^{-3}$ ) é o umidade volumétrica do dia em questão e  $\theta_{cc}$  ( $m^3m^{-3}$ ) é a umidade volumétrica na capacidade de campo. O critério a) se baseou na interceptação da água da chuva pelo dossel (SILVA et al., 1994), nos três casos a água que chega efetivamente ao solo é inferior a acurácia do pluviômetro (0,2 mm). O critério b) foi considerado para simplificar o balanço de água no solo, eliminando os dias com perdas por drenagem, visto que essas só ocorrem quando  $\theta_i > \theta_{cc}$ .

Após a seleção dos dias foi calculado a variação do conteúdo volumétrico no período de 24 horas e multiplicado pela profundidade efetiva do sistema radicular ( $z_r = 0,30$  m) para obtenção da evapotranspiração real (ETR, mm) pelo balanço de água no solo simplificado, pelos critérios acima definidos, como apresentado pela eq. 4.

$$ETR = 1000 (\theta_i - \theta_{i-1}) * z_r \quad (4)$$

em que,  $\theta_{i-1}$  ( $m^3m^{-3}$ ) é a umidade volumétrica do solo do dia anterior.

A ETR obtida como resíduo do balanço de água no solo foi considerada o padrão para comparação entre ETR estimada pelos modelos descritos abaixo e denominada de ETR observada.

## 2. Método do Coeficiente da Cultura Simples - $ETR_1$

Nesse método, o primeiro passo foi calcular  $ET_o$  e posteriormente multiplicá-la pelo coeficiente de cultura para se obter a  $ETC$ . Após essa etapa,  $ETC$  foi multiplicado pelo coeficiente de redução por déficit de água no solo ( $K_s$ ) para obtenção de  $ETR_1$ , como representado na eq. 5 (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998).

$$ETR_1 = (ET_o * K_c) * K_s = ET_c * K_s \quad (5)$$

em que,  $ET_o$  foi obtido pelo método de Penman-Monteith parametrizado no boletim FAO56 (ALLEN et al., 1998) e descrito abaixo.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_{np} - G) + \gamma\left(\frac{900U_2}{T + 273}\right)(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (6)$$

em que,  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $R_{np}$  é o saldo de radiação a superfície ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $G$  é a densidade de fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), considerado zero para a escala diária;  $T$  é a temperatura média do ar a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $u_2$  é a velocidade média do vento a 2 m de altura ( $\text{m.s}^{-1}$ );  $e_s$  é a pressão de vapor à saturação (kPa);  $e_a$  é a pressão parcial de vapor (kPa);  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor no ponto da temperatura média ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).  $R_{np}$  foi obtido através,

$$R_{np} = 0,77R_s - (0,34 - 0,14\sqrt{e_a})4,903 \times 10^{-9} \left( \frac{T_{\text{máx,K}}^4 + T_{\text{mín,K}}^4}{2} \right) \left( 1,35 \frac{R_g}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (7)$$

$$R_{so} = R_a (a + b) \quad (8)$$

$$R_a = 37,586 * d_r (w_s \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin w_s) \quad (9)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad (10)$$

$$\delta = 0,4093 \text{sen} \left( \frac{2\pi J}{365} - 1,405 \right) \quad (11)$$

em que,  $R_g$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) é o total diário da radiação solar incidente na superfície terrestre;  $R_a$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) é o total diário da radiação extraterrestre;  $R_{so}$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) é o total diário da radiação incidente na superfície terrestre se estivesse em condição de céu limpo;  $a = 0,25$  e  $b = 0,50$  são coeficientes da relação linear entre  $R_{so}$  e  $R_a$ ;  $d_r$  é a distância relativa Terra-Sol;  $\phi$  é a latitude local ( $-9,643^\circ$ );  $J$  é o dia Juliano (seqüencial);  $\delta$  (rad) é a declinação solar;  $\omega_s$  (rad) é o ângulo horário ao nascer do Sol;  $T_{\text{max,K}}$  e  $T_{\text{min,K}}$  (K) são as temperaturas máxima e mínima absoluta, respectivamente.

A declividade da curva de pressão de vapor no ponto da temperatura média foi determinada da seguinte forma:

$$\Delta = \frac{4098 e_a(T)}{(T + 237,3)^2} \quad (12)$$

As médias diárias da pressão de saturação e parcial do vapor d'água do ar foram estimadas em função dos extremos diários da temperatura e umidade relativa do ar:

$$e_s = \frac{e_a(T_{\text{máx}}) + e_a(T_{\text{mín}})}{2} \quad (13)$$

$$e_a = \frac{e_a(T_{\text{máx}})UR_{\text{mín}} + e_a(T_{\text{mín}})UR_{\text{máx}}}{200} \quad (14)$$

em que,  $UR_{\text{máx}}$  e  $UR_{\text{mín}}$  (%) são as umidades relativas do ar máxima e mínima diária, respectivamente e  $e_a(T)$  é a pressão de saturação do vapor d'água do ar:

$$e_a(T) = 0,6108 \exp \left( \frac{17,27 T}{T + 237,3} \right) \quad (15)$$

Para estimar  $e_a(T_{\text{máx}})$  ou  $e_a(T_{\text{mín}})$ , substituiu-se  $T$  por,  $T_{\text{máx}}$  ou  $T_{\text{mín}}$ , na eq. 15, respectivamente.

O coeficiente de cultura utilizado no cálculo de  $ET_C$  foi ajustado às condições edafoclimáticas locais. O ajuste de  $Kc_{ini}$  tabelado considerou o intervalo de tempo entre eventos de chuva e sua magnitude e o poder evaporante da atmosfera ( $ET_o$ ). Tais ajustes foram baseados nas condições médias desses elementos no estágio inicial do ciclo, sendo  $Kc_{ini}$  ajustado com o auxílio do método gráfico sugerido no boletim FAO56. No ajuste de  $Kc_{med}$  e  $Kc_{final}$  as condições climáticas e características da cultura, as equações para as respectivas fases de crescimento, são descritas abaixo:

$$Kc_{int} = Kc_{int(Tab)} + [0,04(U_2 - 2) - 0,04(UR_{min} - 45)] \left( \frac{h_1}{3} \right)^{0,3} \quad (16)$$

$$Kc_{final} = Kc_{final(Tab)} + [0,04(U_2 - 2) - 0,04(UR_{min} - 45)] \left( \frac{h_2}{3} \right)^{0,3} \quad (17)$$

em que,  $Kc_{int(Tab)}$  e  $Kc_{final(Tab)}$  são, respectivamente, os valores do coeficiente de cultura no estágio intermediário (1,20) e (0,60) final,  $h_1$  e  $h_2$  são respectivamente as alturas médias na fase intermediária e final. Os coeficientes da cultura ajustados foram interpolados para o ciclo da cultura do milho em função do comprimento das suas fases de desenvolvimento. As fases de desenvolvimento (Tabela 4) foram estabelecidas segundo recomendação da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO - *Food and Agriculture organization*) (ALLEN et al., 1998), para um ciclo da cultura de 126 dias.

Tabela 4. Duração e período das fases de desenvolvimento para o cultivo de milho em Arapiraca/Alagoas no período de abril a setembro de 2005.

<b>Fase de desenvolvimento</b>	<b>Período</b>	<b>Duração (dias)</b>
Inicial (I)	04/06 a 24/06	20
Crescimento (II)	25/06 a 29/07	35
Intermediária (III)	30/08 a 07/09	40
Final (IV)	08/09 a 08/10	31

A etapa final para se alcançar os valores de  $ETR_1$ , é a multiplicação de  $ETC$  pelo  $Ks$ . Os diferentes métodos para obtenção de  $Ks$  estão detalhados a seguir. A

nomenclatura de  $ETR_1$  será atribuída de acordo com o método de determinação de  $K_s$ , detalhes na Tabela 5.

Tabela 5. Variação da Nomenclatura de ETR estimada pelo método do  $K_c$  único ( $ETR_1$ ) em função dos métodos de determinação do coeficiente de redução de água no solo ( $K_s$ )

Nomenclatura de $ETR_1$	Variantes do produto
$ETR_{1,a}$	$ETc * K_{S,a}$
$ETR_{1,b}$	$ETc * K_{S,b}$
$ETR_{1,c}$	$ETc * K_{S,c}$

a) Método logarítmico (BERNARDO, 1995) -  $K_{S,a}$

$$K_{S,a} = \frac{\ln(CRA + 1)}{101} \quad (18)$$

em que, CRA (%) é a capacidade real de água no solo. CRA foi determinada como  $[(\theta_i - \theta_{pm}) / (\theta_{cc} - \theta_{pm})] * 100$ .

a) Método FAO56 (ALLEN et al., 1998) -  $K_{S,b}$

$$K_{S,b} = \frac{CAD - D_r}{CAD - AFD} = \frac{CAD - D_r}{(1 - p)CAD} \quad (19)$$

em que, CAD é a capacidade de água total disponível, AFD é a água do solo facilmente disponível,  $D_r$  é a depleção de água no solo, todas expressas em milímetro.  $p$  é a fração de água extraível sem que a produção seja penalizada. Considerou-se  $p$  de 0,55 (ALLEN et al., 1998). A depleção de água na zona radicular ( $D_r = \theta_{cc} - \theta_i$ ) foi determinada pelas estimativas do conteúdo de água no solo obtidas com as medidas do sensor de potencial de água no solo.

b) Método hiperbólico (NOILHAN e PLANTON, 1989) –  $K_{s,c}$

$$K_{S,c} = \frac{\theta_i - \theta_{pm}}{\theta_{cc} - \theta_{pm}} \quad (20)$$

em que,  $K_{S,c}$  é um fator de ponderação da água do no solo normalizado (varia entre 0 e 1).

### 3. Método de Penman-Monteith com a Resistência da Superfície do Dossel ( $ETR_2$ )

A equação original de Penman-Monteith está descrita abaixo.

$$ETR_2 = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta(R_{no} - G) + (\rho_a c_p DPV / r_a)}{\left( \Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right)} \quad (21)$$

Em que,  $ETR_2$  é a evapotranspiração ( $\text{mm d}^{-1}$ );  $R_{no}$  é o saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $c_p$  é o calor específico do ar seco ( $1013 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ );  $DPV$  ( $e_s - e_a$ , kPa) é o déficit de pressão de vapor da água;  $\rho_a$  é a densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $r_c$  é a resistência da superfície do dossel ( $\text{s m}^{-1}$ ) e  $r_a$  é a resistência aerodinâmica ( $\text{s m}^{-1}$ ). O saldo de radiação para a cultura do milho usado nesse método foi apresentado no item 3.3 (SILVA NETO, 2006). A resistência aerodinâmica entre o topo do dossel e o nível de referência, em condições de estabilidade neutra, foi determinada pela seguinte relação (Jensen et al., 1990):

$$r_a = \frac{\ln((Z-d)Z_{om}^{-1}) \ln((Z-d)Z_{ov}^{-1})}{k^2 u} \quad (22)$$

Em que,  $Z$  é a altura de medida da velocidade do vento e da temperatura do ar (m);  $Z_{om}$  é o comprimento de rugosidade da superfície para o transporte de momentum (m);  $Z_{ov}$  é o comprimento da superfície de rugosidade para o transporte de vapor e calor,

considerado igual, (m);  $k$  é a constante de Von Kármán (0,41);  $u$  é a velocidade horizontal do vento ( $m\ s^{-1}$ ); e  $d$  é o deslocamento do plano zero (m).

Os parâmetros de rugosidades  $d$ ,  $Z_{om}$  e  $Z_{ov}$  foram estimados pelas seguintes relações:

$$d = 0,64 * h_c \text{ (COWAN, 1967)} \quad (23)$$

$$Z_{om} = 0,16h_c \text{ (TANNER E PELTON, 1960)} \quad (24)$$

$$Z_{ov} = 0,15 * Z_{om} \quad (25)$$

Avaliaram-se três métodos para a estimativa da resistência da cultura ( $r_c$ ) do modelo de Penman-Monteith original (Tabela 6).

- a) Modelo de Ortega-Farias (ORTEGA-FARIAS et al., 2004)

A resistência da superfície do dossel, quando depende dos fatores climáticos e do conteúdo de água no solo, é definida como a resistência de transferência de água do solo e da planta para a atmosfera. A combinação dos efeitos da atmosfera e das condições de água no solo em  $r_{co}$  foi expressa da seguinte forma:

$$r_{co} = \frac{\rho_a C_p DPV}{\Delta(R_n - G)} K_{sc}^{-1} = r^* K_{sc}^{-1} \quad (26)$$

em que,  $r^*$  é a resistência da cultura em condições potenciais ( $s\ m^{-1}$ ).

- b) Modelo parametrizado pelo IAF (ALLEN et al., 1998)

A resistência da superfície do dossel também pode ser parametrizada pelo Índice de Área Foliar, como segue abaixo:

$$r_{ci} = \begin{cases} IAF < 1 & \Rightarrow 200 \text{ s.m}^{-1} \\ IAF \geq 1 & \Rightarrow \frac{r_s}{0,5 IAF} \end{cases} \quad (27)$$

Avaliaram dois valores de  $r_s$ , o primeiro foi obtido pelas medidas do IRGA e o segundo assumiu o valor de  $100 \text{ s m}^{-1}$ , conforme sugerido por Monteith (1965). Nesses modelos determinaram-se  $ET_c$  com as resistências da cultura e posteriormente, para determinar ETR, multiplicou-se  $ET_c$  Ks. O Ks utilizado foi o que apresentou melhores resultados nas análises do método do coeficiente de cultivo simples.

Os valores de  $ETR_2$  obtidos pelo método de Penman-Monteith com a resistência do dossel proposta por Ortega-Farias ( $r_{co}$ ) recebeu a nomenclatura de  $ETR_{2a}$  e os valores de  $ETR_2$  resultantes do mesmo método, só que, usando  $r_{ci}$ , resistência do dossel parametrizada pelo IAF, receberam a nomenclatura  $ETR_{2b}$  ( $r_s = 100 \text{ s m}^{-1}$ ) e  $ETR_{2c}$  ( $r_s = 73,2 \text{ s m}^{-1}$  - IRGA).

Tabela 6. Variação da Nomenclatura de ETR estimada pelo modelo de Penman-Monteith ( $ETR_2$ ) de acordo com os métodos de determinação da resistência da cultura ( $r_c$ )

Nomenclatura de $ETR_1$	$r_c$
$ETR_{2,a}$	Ortega-Farias et al. (2004)
$ETR_{2,b}$	Allen et al. (1998) $r_c = 100 \text{ s m}^{-1}$
$ETR_{2,c}$	$r_c = 73,2 \text{ s m}^{-1}$ (IRGA)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

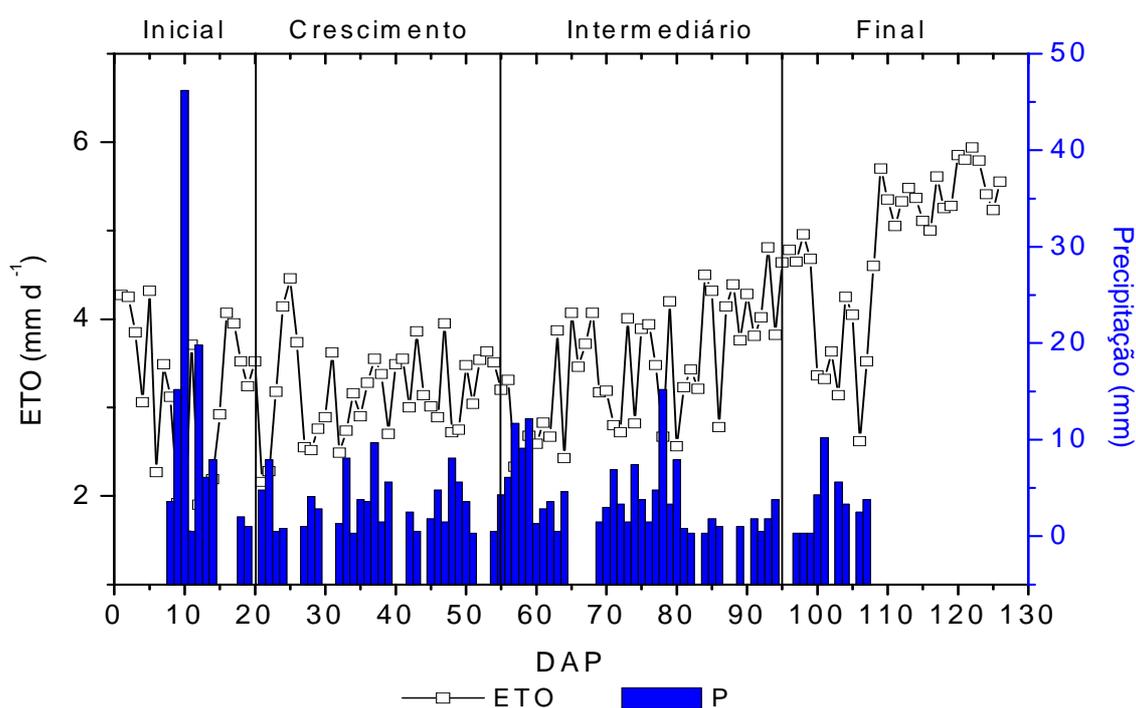
### 4.1. Condições Ambientais

Na Figura 5 é apresentada a variação da precipitação pluvial e da evapotranspiração de referência durante o período de cultivo. O total pluviométrico para todo o período experimental foi de 347 mm, distribuídos em 75 dias, ou seja, observaram-se eventos de chuva em torno de 59,5% do ciclo. A média por evento diário durante o ciclo foi de 4,6 mm. A exceção foi na fase final de desenvolvimento, onde se observou precipitações apenas no seu início. O maior evento de precipitação diária ocorreu na fase inicial (46,2 mm, 10 DAP). Nessa fase, o total pluviométrico foi 102,4 mm, distribuído em nove dias (45 % dos dias), o que resultou numa média elevada por evento de 11,4 mm. A fase de crescimento totalizou 26 dias (74,3 % dos dias) com precipitação e total de 89,2 mm, ou seja, magnitude média por evento de 3,4 mm. O maior e menor evento de chuva nessa fase ocorreu aos 37 (9,7 mm) e 34 (0,3 mm) DAP, respectivamente. A fase intermediária foi a que apresentou o maior total de precipitação do período experimental, totalizando 125 mm distribuídos em 31 dias. Contudo, a média por evento nessa fase de desenvolvimento foi de 4,0 mm e inferior a da fase inicial. Os valores máximo e mínimo diários da precipitação foram de 15,2 e 0,3, respectivamente. A fase final de desenvolvimento foi caracterizada pelo término dos eventos de precipitação do período experimental. O total de chuva nessa fase foi de 30,5 mm, distribuídos em apenas nove dias. A média por evento nessa fase foi análoga a da fase de crescimento e de 3,4 mm.

Os valores de ETo não apresentaram tendência definida do início do ciclo até aproximadamente o final da fase intermediária (85 DAP), com valores oscilando em torno de 3,5 mm d<sup>-1</sup>. Esse período (início de junho a final de agosto) compreendeu parte do período chuvoso da região. Após esse período, ETo apresentou padrão de aumento e atingiu valores de aproximadamente 5,9 mm d<sup>-1</sup> no final do ciclo (122 DAP) e coincidiu com o final da fase intermediária e a fase final. Tendência análoga é observada para a temperatura do ar (Figura 6) e a radiação solar (Figura 7); e inversa a umidade relativa do ar (Figura 6). A temperatura do ar variou em torno de 23,5 °C entre o início do ciclo e 85 DAP, enquanto, no mesmo período, a umidade relativa do ar oscilou entre 82 %. Posterior a 85 DAP, a tendência da temperatura do ar foi de aumento, com máximo

(26,3 °C) próximo ao final do ciclo. Nesse mesmo período, observou-se padrão de diminuição da umidade relativa do ar, com valores abaixo de 72 % nos dois últimos decêndios do ciclo.

As tendências desses elementos se ajustam, pois os elementos citados estão diretamente relacionados, portanto, o aumento da radiação solar e da temperatura do ar na fase final do ciclo, associado a ausência de precipitação pluvial, o que indicou baixa nebulosidade, e a redução da umidade relativa do ar condicionaram a elevação da ETo.



**Figura 5.** Variação da Precipitação (P) da e evapotranspiração de referência (ETo) em função dos dias após o plantio (DAP) para um cultivo de milho em Arapiraca-AL no período de junho a setembro de 2005. Em detalhe as fases fenológicas descritas no boletim FAO-56 para a cultura do milho.

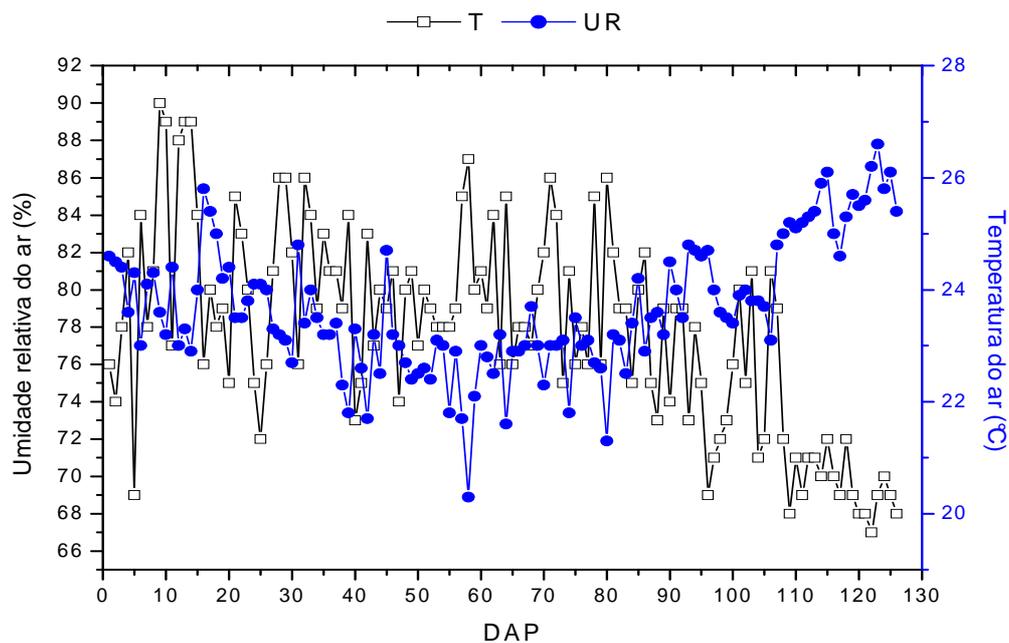
O valor médio diário de ETo para o período de cultivo foi de 3,7 mm d<sup>-1</sup>, sendo a fase final de desenvolvimento, a que apresentou os maiores valores de ETo. Nessa fase, ETo variou entre 2,6 (106 DAP) e 5,9 (122 DAP) mm d<sup>-1</sup>, com média de 4,8 mm d<sup>-1</sup>. Na fase intermediária, o valor médio de ETo foi de 3,5 mm d<sup>-1</sup> e os extremos foram 2,3 (57 DAP) e 5,0 (93 DAP) mm d<sup>-1</sup>. A fase de crescimento teve valor máximo, mínimo e médio de 4,5 (25 DAP), 2,2 (21 DAP) e 3,2 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente. Os menores valores de ETo foram observados na fase inicial, os quais, estiveram entre 4,3 (5 DAP)

e 1,6 (DAP) mm d<sup>-1</sup>. O valor médio de ETo para essa fase foi de 3,2 mm d<sup>-1</sup>. A distribuição dos valores da ETo nas fases fenológicas são apresentadas na Tabela 7. A evapotranspiração de referência acumulada durante o ciclo foi de 463,1 mm d<sup>-1</sup>.

Tabela 7. Valores da evapotranspiração de referência (ETo, mm d<sup>-1</sup>) por fase de desenvolvimento do milho na região de Arapiraca - AL no período de junho a setembro de 2005

	Fases Fenológicas							
	Inicial		Crescimento		Intermediária		Final	
	ETo (mm dia <sup>-1</sup> )	DAP						
Máximo	4,3	5	4,5	25	4,8	93	5,9	122
Média	3,2	-	3,2	-	3,5	-	4,8	-
Mínimo	1,6	10	2,2	21	2,3	57	2,6	106

No término da fase de crescimento e início da fase intermediária ocorreu diminuição (aumento) nos valores de temperatura do ar (umidade relativa do ar), fato esse que pode ser atribuído a nebulosidade, associada à intensa precipitação no início da terceira fase fenológica (crescimento). Outra evidência da presença de nebulosidade nessa transição de fase é a atenuação da radiação solar, que ocasionou redução dos valores da ETo. No final do período intermediário (85 DAP), as temperaturas do ar (umidade relativa do ar) começaram a elevar-se (diminui) até máximo (mínimo) de 26,6 °C (73%) no final do ciclo. Nesse mesmo período observou-se redução, até cessar os eventos de precipitação pluvial, acompanhado de aumento da radiação solar. A Tabela 8 apresenta os valores das temperaturas mínimas, médias e máximas para fases de desenvolvimento da cultura de milho.



**Figura 6.** Variação da Temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR) do período diário em função dos dias após o plantio (DAP) no município de Arapiraca-AL, no período de junho a setembro de 2005.

No término da fase de crescimento e início da fase intermediária ocorreu diminuição (aumento) nos valores de temperatura do ar (umidade relativa do ar), fato esse que pode ser atribuído a nebulosidade, associada à intensa precipitação no início da terceira fase fenológica (crescimento). Outra evidência da presença de nebulosidade nessa transição de fase é a atenuação da radiação solar, que ocasionou redução dos valores da ETo. No final do período intermediário (85 DAP), as temperaturas do ar (umidade relativa do ar) começaram a elevar-se (diminui) até máximo (mínimo) de 26,6 °C (73%) no final do ciclo. Nesse mesmo período observou-se redução, até cessar os eventos de precipitação pluvial, acompanhado de aumento da radiação solar. A Tabela 8 apresenta os valores das temperaturas mínimas, médias e máximas para fases de desenvolvimento da cultura de milho.

Tabela 8. Temperaturas mínimas, médias e máximas diárias do ar e Graus-dia para as fases de desenvolvimento em um cultivo de milho em Arapiraca- AL, no período de junho a setembro de 2005

Fase Fenológica	Temperatura do ar (°C)			GD (°C)
	Mínima	Média	Máxima	
Inicial	22,9	24,1	25,8	282
Crescimento	21,7	23,1	24,8	459
Intermediário	20,3	23,0	24,8	520
Final	23,1	24,2	26,6	440
Acumulado				1701

O saldo de radiação (Rn) e a radiação global (Rg) durante o período experimental estão ilustradas na Figura 7. Os valores médios de Rg e Rn foram de 17,4 e 13,6 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente. Os valores mínimo dessas duas variáveis ocorreram na fase inicial de desenvolvimento, sendo de 4,6 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para Rg e de 3,6 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para Rn. O dia de ocorrência dos valores mínimos dessas variáveis em cada fase fenológica foi idêntico (9 DAP), o que não ocorreu para os valores máximos. Os máximos de Rg e Rn para a fase inicial ocorreram em 16 DAP (19,2 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e 16 DAP (15,1 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), respectivamente. O valor médio de Rg e Rn para a fase inicial foi de 13,0 e 10,2 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente. A fase de crescimento apresentou aumento no total de radiação solar superior a 200 % em relação a fase anterior. Os valores de Rg mínimo, médio e máximo para a fase de crescimento foram de 9,2 (20 DAP), 15,8 e 20,4 (24 DAP) MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente. Os valores de Rn para essa mesma fase ficaram entre 7,9 (21 DAP) e 16,1 (24 DAP) MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, com o valor médio de 12,5 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. A fase intermediária teve aumento do total radiação de 20% em relação à fase anterior. Os valores de Rg oscilaram entre 11,2 (56 DAP) e 22,9 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (83 DAP), com valor médio de 17,1 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. Já os valores mínimo, médio e máximo para Rn foram de 8,8 (56 DAP), 13,4 e 18,0 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (83 DAP). No final da fase intermediária (83 DAP) e na maior parte da fase final de desenvolvimento houve tendência crescente da radiação solar. Entre essas duas fases não houve aumento significativo no total de radiação solar, porém os valores diários observados para Rg e Rn na fase final foram maiores que os registrados na fase intermediária. Os valores médios de Rg e Rn para a fase final foram de 21,2 e 16,6 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente.

Os valores mínimos de  $R_g$  ( $13,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e  $R_n$  ( $10,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) ocorreram no mesmo dia (105 DAP). Padrão similar foi observado para os valores máximos, de  $26,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e de  $21,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente.

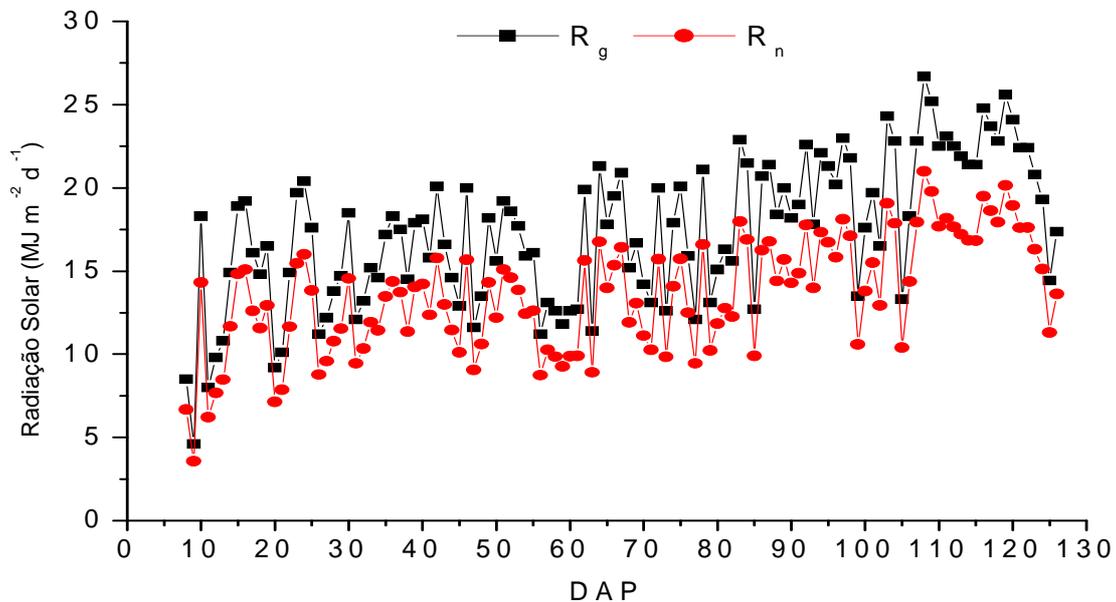


Figura 7. Variação da Radiação solar global ( $R_g$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e do saldo de radiação ( $R_n$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) para um cultivo de milho em Arapiraca- AL no período de junho a setembro de 2005.

A Figura 8 ilustra a variação do conteúdo de água no solo ( $A_L$ ) para o período experimental. A fase inicial de desenvolvimento apresentou 35% dos dias (sete dias) com valores de  $A_L$  acima da capacidade de campo, ou seja, na saturação, com valor máximo de  $66,7 \text{ mm}$  (12 DAP). Nessa mesma fase, o valor mínimo de  $A_L$  ( $37,0 \text{ mm}$ ) ocorreu dois dias antes do valor máximo. Essa amplitude deve-se a ocorrência de uma intensa precipitação ( $65 \text{ mm}$ ) ocorrida entre os dias 8 e 10 após o plantio, as quais corresponderam a 64% do total da fase. Na fase de crescimento,  $A_L$  esteve na água facilmente disponível em 86 % dos dias (31 dias), com valores entre  $64,0$  (49 e 50 DAP) e  $33,0 \text{ mm}$  (48 DAP). Os dias 38 ( $61,3 \text{ mm}$ ), 49 ( $64,0 \text{ mm}$ ), 50 ( $64,0 \text{ mm}$ ) e 51 ( $63,7 \text{ mm}$ ) após o plantio estiveram com valores de  $A_L$  na saturação, o que representou apenas 14% dos dias. A fase intermediária apresentou 14 dias (35 %) com  $A_L$  na saturação, o valor máximo alcançou  $65,0 \text{ mm}$  (81 DAP). A maior parte dessa fase, 22 dias (55 %), esteve na AFD. No término da fase final desenvolvimento os valores de  $A_L$

decaíram, devido à intensificação da radiação solar, maior evapotranspiração da cultura, e a diminuição do volume de chuvas, ou seja, consumo elevado e baixa reposição de água no solo. No intervalo de DAP entre 92 e 95,  $A_L$  esteve abaixo da AFD, com o ultimo dia desse intervalo apresentado o mínimo da fase (29,4 mm). Durante toda a fase final,  $A_L$  esteve sempre abaixo da AFD. No início da fase houve pequena elevação dos valores de  $A_L$  devido a um evento de precipitação, que se estendeu desde 99 a 106 DAP (30 mm). O valor máximo de  $A_L$  nessa fase ocorreu aos 109 DAP (31,78 mm). Após esse máximo,  $A_L$  decaiu até alcançar o mínimo de 20,5 mm (126 DAP).

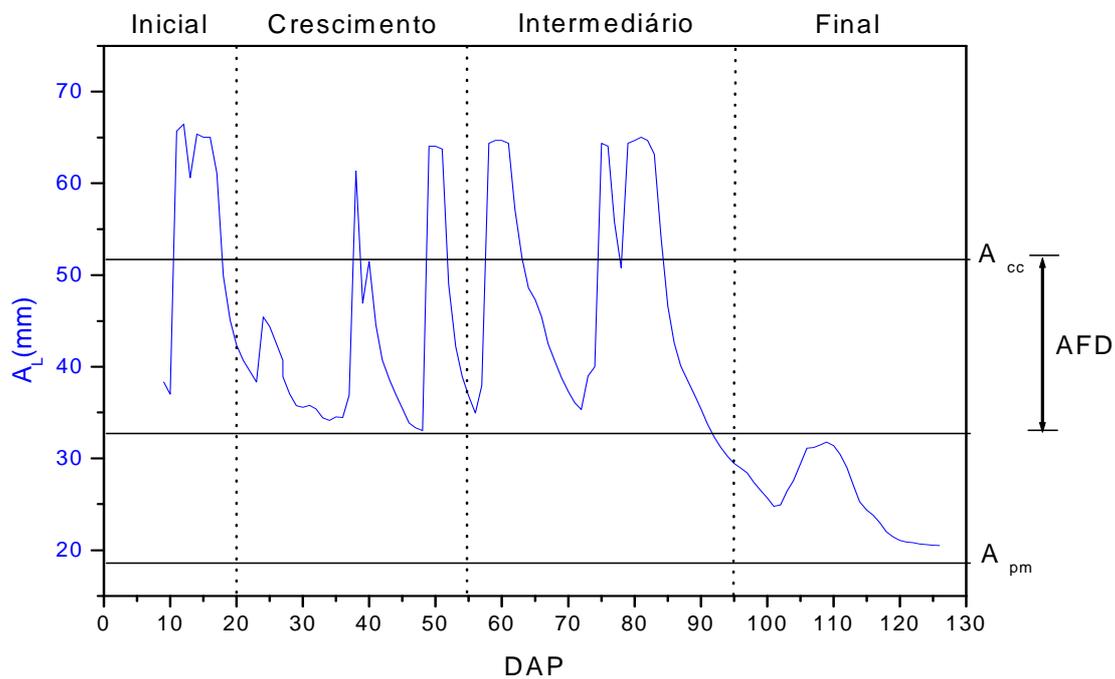


Figura 8. Variação do conteúdo de água no solo ( $A_L$ , mm) para um cultivo de milho em Arapiraca-AL no período de junho a setembro de 2005. Em destaque o conteúdo de água na capacidade na capacidade de campo ( $A_{cc}$ ), e no ponto de murcha permanente ( $A_{pm}$ ) e água facilmente disponível (AFD).

#### 4.2. Características Biométricas da Cultura

A variação da altura da planta ( $h_c$ ) em função dos DAP está ilustradas na Figura 9. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da curva ajustada pelo modelo sigmóide de Boltzmann foi elevado (0,9952). Os coeficientes da equação de Boltzmann estão listados na Tabela 9. A fase de crescimento apresentou elevada taxa de crescimento da

altura, com  $h_c$  entre 0,19 m, no início da fase, até 1,69 m, no seu final, o que totalizou taxa de crescimento de  $0,043 \text{ m d}^{-1}$ . A altura máxima atingida pela cultura foi de 2,13 m aos 84 DAP. A partir dessa data, a altura da cultura pelo modelo foi constante até o final do ciclo.

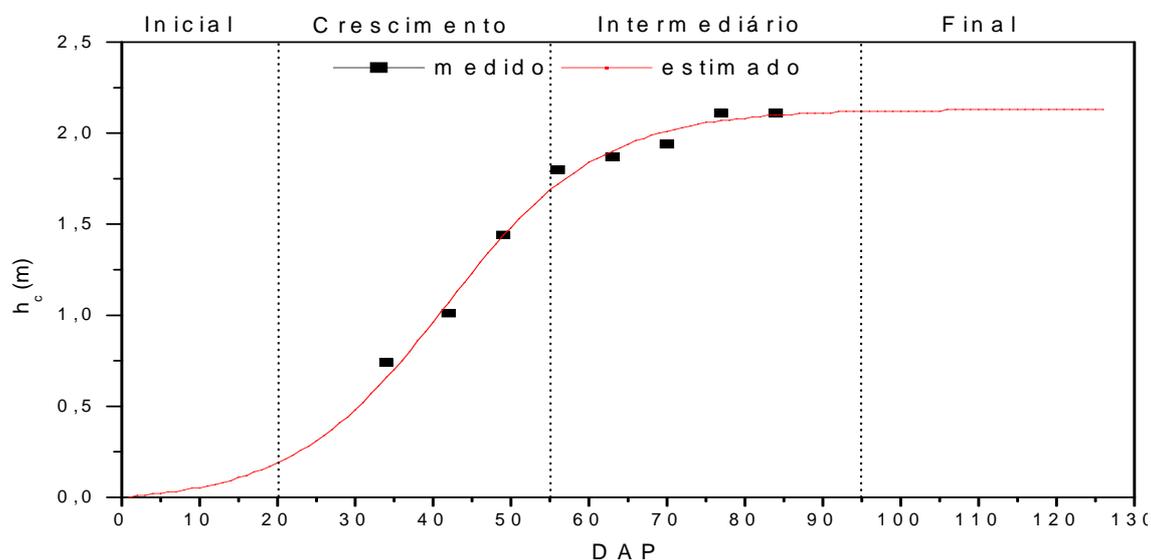


Figura 9. Variação da altura da planta ( $h_c$ ) em função dos dias após o plantio (DAP) para um cultivo de milho em Arapiraca-AL no período de junho a setembro de 2005. Os pontos pretos são os valores de  $h_c$  medidos em campo e a linha vermelha indica a simulação de  $h_c$  pela equação Sigmoide de Boltzmann.

Tabela 9. Parâmetros da Equação Sigmoide de Boltzmann para estimativa da altura da planta ( $h_c$ ) em função dos dias após o plantio (DAP)

Parâmetros para equação de Boltzmann	Valores
$A_1$	0,00
$A_2$	2,13
$X_0$	41,55
$dx$	9,93
$R^2$	0,9952

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2$$

A variação do índice de área foliar (IAF) em função dos DAP durante o ciclo de cultivo está apresentada na Figura 10. Para estimativa desse parâmetro por meio da equação de Boltzamann (Tabela 10), os dias foram divididos em dois períodos, os quais foram determinados pelo valor máximo alcançado pelo IAF (3,3 aos 63 DAP), ou seja, do dia da emergência (5 DAP) ao valor máximo de IAF, período 1 (tendência crescente de IAF), e a partir dos 63 aos 98 DAP, período 2 (tendência decrescente de IAF). No período 1 a tendência do IAF foi de aumento até o seu máximo, enquanto no período 2 a tendência foi aproximadamente constante até o início da fase final, a partir do qual o IAF apresentou diminuição, em função da senescência das folhas. Os coeficientes de determinação para o período 1 e 2 foram, respectivamente, 0,99 e 0,98. De forma similar a altura da planta, as maiores taxas de crescimento do IAF foram observadas na fase de crescimento.

Para um cultivo de milho irrigado com população de 70.000 plantas  $\text{há}^{-1}$  utilizando a variedade BR106, realizado no período de janeiro a abril de 2002 no município de Rio Largo/Alagoas, encontrou-se um IAF máximo de 4,51 aos 52 DAE (TEODORO, 2003).

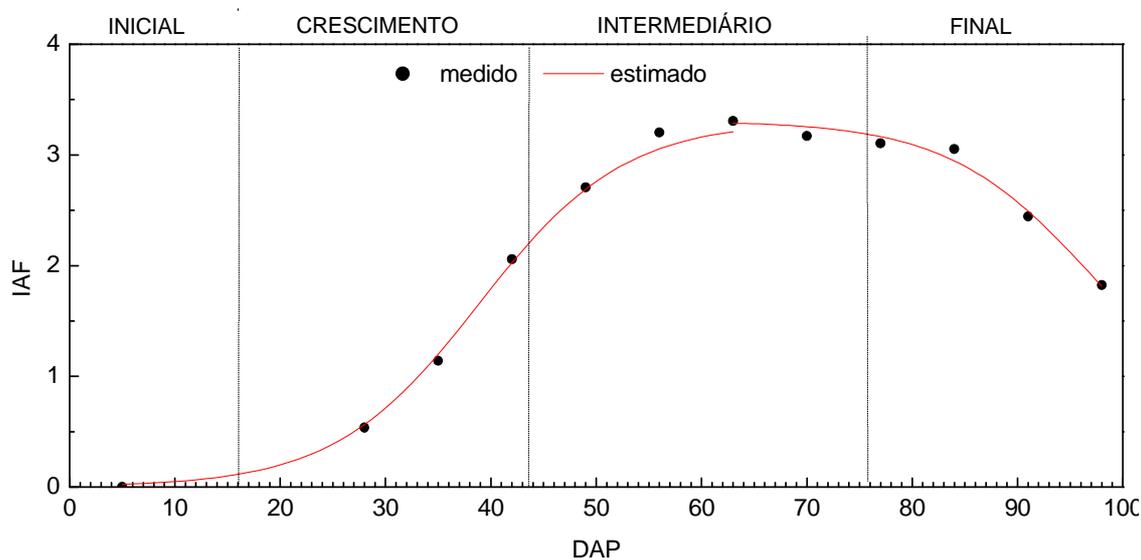


Figura 10. Variação do Índice de Área Foliar (IAF) em função dos dias após o plantio (DAP) para um cultivo de milho em Arapiraca-AL no período de junho a setembro de 2005. Os pontos pretos são os valores de IAF medidos em campo e a linha vermelha indica a simulação de IAF pela equação Sigmoidal de Boltzamann.

Tabela 10. Parâmetros da Equação Sigmóide de Boltzamann para estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) em função dos DAP.

<b>Parâmetros para equação de Boltzamann</b>	<b>Grupo 1*</b>	<b>Grupo 2**</b>
<b>A<sub>1</sub></b>	<b>0,00</b>	<b>3,31</b>
<b>A<sub>2</sub></b>	<b>3,31</b>	<b>0,49</b>
<b>X<sub>0</sub></b>	<b>38,87</b>	<b>97,16</b>
<b>Dx</b>	<b>6,23</b>	<b>6,87</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>
$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2$	<b>* (5 – 63 DAP)</b>	<b>** (63 – 98 DAP)</b>

### 4.3. Evapotranspiração Real

#### 4.1.1 Método do coeficiente simples

O valor médio de  $ETR_{BH}$  dos dias selecionados durante o ciclo foi  $1,54 (\pm 1,06)$   $mm\ d^{-1}$ , sendo o máximo de  $4,64\ mm\ d^{-1}$ , observado na fase intermediária (85 DAP), enquanto que o mínimo ( $0,11\ mm\ d^{-1}$ ) ocorreu no final do ciclo (125 DAP - fase final). Em relação aos valores estimados pelos sub-modelos de Ks, considerando os mesmos dias selecionados no método do balanço de água no solo, a média foi de  $1,77 (\pm 1,08)$   $mm\ d^{-1}$  para  $ETR_{1,c}$  (Ks hiperbólico) e de  $2,98 (\pm 1,47)$  e  $3,11 (\pm 0,99)$   $mm\ d^{-1}$ , para , respectivamente,  $ETR_{1,b}$  (Ks proposto no boletim FAO56) e  $ETR_{1,a}$  (Ks logarítmico). Ou seja, a diferença entre a média de  $ETR_{1,c}$  em relação à média observada ( $ETR_{BH}$ ) foi inferior a 15 % ( $0,23\ mm\ d^{-1}$ ), enquanto para  $ETR_1$ , baseada nos outros dois métodos de Ks, a diferença foi de 94 ( $ETR_{1,b}$ ) e 115 % ( $ETR_{1,a}$ ).

Os valores máximos estimados de  $ETR_1$  foram próximos do valor observado, e de  $4,22$  ( $ETR_{1,c}$ , 63 DAP),  $4,65$  ( $ETR_{1,a}$ , 85 DAP) e  $4,95\ mm\ d^{-1}$  ( $ETR_{1,b}$ , 88 DAP), todos na fase intermediária (Tabela 12). Contudo, apenas o máximo para  $ETR_{1,a}$  foi observado na mesma data de  $ETR_{BH}$ . Os mínimos foram observados na mesma data para todos os métodos (125 DAP), mas seus valores foram de 0,09; 0,20 e 0,90 para  $ETR_{1,c}$ ,  $ETR_{1,b}$  e  $ETR_{1,a}$ , respectivamente. Em termos relativos às diferenças entre os

mínimos estimados e o observado foi entre 18,2 % ( $ETR_{1,b}$ ) a, aproximadamente, sete vezes o valor observado no caso de  $ETR_{1,a}$ .

Tabela 12. Valores mínimos, médios e máximos de  $ETR_1$  e  $ETR_{BH}$ . Em detalhes os dias após o plantio nos quais os valores foram observados.

	Mínimo (mm.dia <sup>-1</sup> )	DAP	Médio (mm.dia <sup>-1</sup> )	Máximo (mm.dia <sup>-1</sup> )	DAP
$ETR_{1,a}$	0,90	125	3,11	4,65	85
$ETR_{1,b}$	0,20	125	2,98	4,95	88
$ETR_{1,c}$	0,09	125	1,77	4,22	63
$ETR_{BH}$	0,11	125	1,54	4,64	85

Observando a Figura 11, nota-se uma tendência geral de aumento de  $ETR_1$  do início do ciclo a aproximadamente 85 DAP, seguida de diminuição até o final do ciclo, independente do  $K_s$ , e para  $ETR_{BH}$ . Ou seja, os métodos apresentam sensibilidade de variação para ETR. As tendências observadas foram acompanhadas de elevada amplitude diária de ETR. Como do início do ciclo até 85 DAP, a demanda atmosférica ( $ET_o$ ) não apresentou tendência definida e a água no solo estava na AFD e assim não espera-se que as taxas de evapotranspiração sejam afetadas significativamente, sendo o aumento observado para ETR relacionado principalmente ao incremento da sua área foliar, resultado do crescimento da cultura, como apresentado anteriormente. Contudo o padrão de diminuição de ETR no final do ciclo foi observado mesmo com o aumento da radiação solar e de  $ET_o$ . Essa tendência foi resposta da evapotranspiração a diminuição da disponibilidade de água no solo.

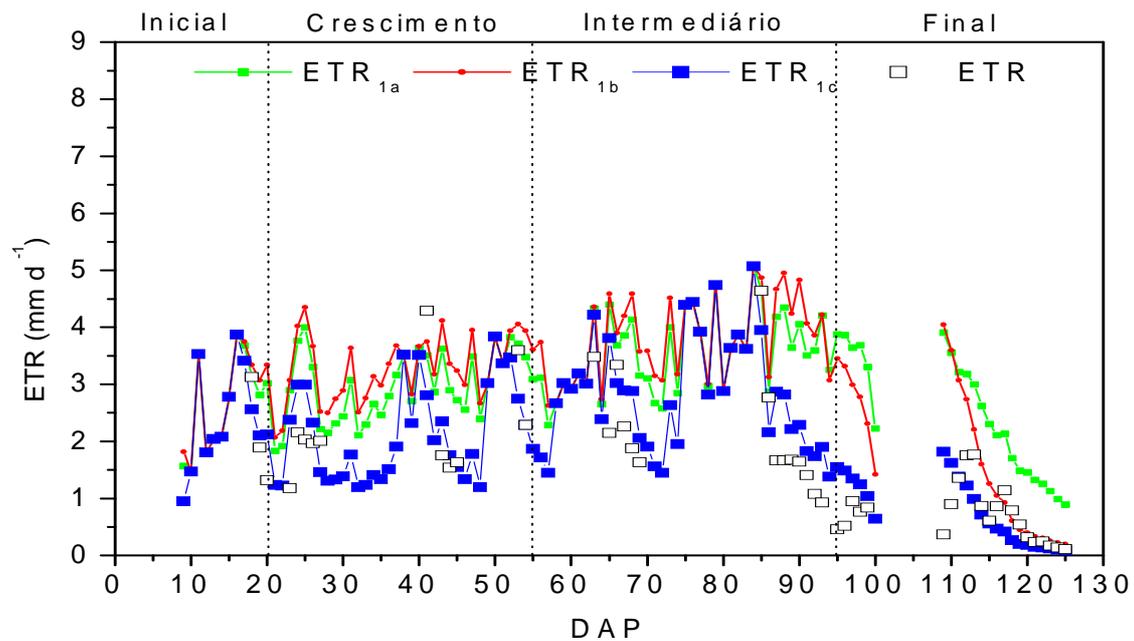


Figura 11. Estimativa da Evapotranspiração Real para um cultivo de milho em Arapiraca - AL no período de junho a setembro de 2005 pelo método do coeficiente simples, utilizando Ks logarítmico (Bernardo, 1995) ( $ETR_{1,a}$ ), boletim FAO56 (ALLEN et al., 1998) ( $ETR_{1,b}$ ) e Ks hiperbólico (NOILHAN e PLANTON, 1989) ( $ETR_{1,c}$ ) e a evapotranspiração pelo balanço hídrico (ETR).

A elevada oscilação diária está relacionada à precipitação pluvial (Figura 5), que mostrou relação inversa a ETR, uma vez que, as chuvas são associadas a nebulosidade, ou seja, diminuição da radiação solar e a disponibilidade de água no solo. Durante os eventos de precipitação observou-se decréscimo da evapotranspiração real, independente do método e ou de ETR observada, e após a diminuição ou o fim desses eventos ocorreu padrão contrário, e assim, aumento de ETR.

Para a comparação dos métodos foi realizada uma análise de regressão linear simples entre os valores estimados pelos sub-modelos de Ks e os valores de  $ETR_{BH}$ , no intuito de se determinar o intercepto (a), o coeficiente angular (b) e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) da regressão entre os valores estimados pelos métodos e o observado ( $ETR_{BH}$ ). Em paralelo foi realizada uma análise gráfica da dispersão dos valores em torno da reta 1:1. O melhor ajuste do modelo se dá quando o coeficiente angular se aproxima de 1 e menor for a interceptação.

Na Figura 12 está ilustrada a relação entre a evapotranspiração real pelo balanço hídrico ( $ETR_{BH}$ ) e a evapotranspiração pelo método do coeficiente simples ( $ETR_1$ ). Na Figura 12a estão os valores de  $K_s$  logarítmico ( $ETR_{1,a}$ ). O coeficiente de determinação foi baixo e de 0,3067, o que indicou elevada dispersão dos valores estimados, como observado pela dispersão em torno da linha 1:1. Os valores de  $a$  e  $b$  foram  $2,31 \text{ mm d}^{-1}$  e  $0,519$ , respectivamente. O valor de  $b$  foi significativamente inferior a 1, considerado ideal, enquanto o valor do intercepto foi elevado.

As estimativas baseadas nesse sub-modelo apresentaram tendência de sempre superestimar os valores observados. As superestimativas foram maiores para valores abaixo de  $2,5 \text{ mm d}^{-1}$  e em torno de 70 %. Esse resultado indicou que o método do  $K_s$  logarítmico não conseguiu penalizar a evapotranspiração de forma satisfatória, como visto também na Figura 11, sobremaneira para o final do ciclo da cultura. Para valores de  $ETR_{BH} > 2,5 \text{ mm d}^{-1}$  as diferenças foram em torno de 7,7 %. Os valores de  $ETR_{BH}$  superiores a  $2,5 \text{ mm d}^{-1}$  coincidiram com o conteúdo de água no solo próximo a capacidade de campo, assim espera-se que  $ETR_{BH}$  não seja significativamente penalizada pela disponibilidade de água no solo. Para essa condição, o modelo  $K_{s,a}$  apresentou valores  $> 0,96$  e, assim,  $ETR_{BH}$  próxima de  $ET_c$ . Ou seja, as estimativas pelo modelo do coeficiente de cultivo simples para condições próximas da potencial apresentaram resultados satisfatórios. A raiz do quadrado médio do erro (RQME) para  $ETR_{1,a}$  foi de  $1,83 \text{ mm dia}^{-1}$ , o que representou 119 % da média de  $ETR_{BH}$ .

Para a relação entre os valores estimados ( $ETR_{1,b}$ ) pelo segundo sub-modelo de  $K_s$  - boletim FAO56 - e os valores de  $ETR_{BH}$  (Figura 12b), o valor de  $R^2$  foi baixo (0,3806), similar a  $ETR_{1,a}$ . Foram observadas tendências de elevada dispersão, com valores afastados da linha 1:1. Contudo, seu coeficiente angular da reta (0,859) foi próximo de 1, enquanto o intercepto foi elevado (1,65). O valor da RQME foi de  $1,84 \text{ mm d}^{-1}$ . Esse sub-modelo também não mostrou boa acurácia para a estimativa da evapotranspiração real.

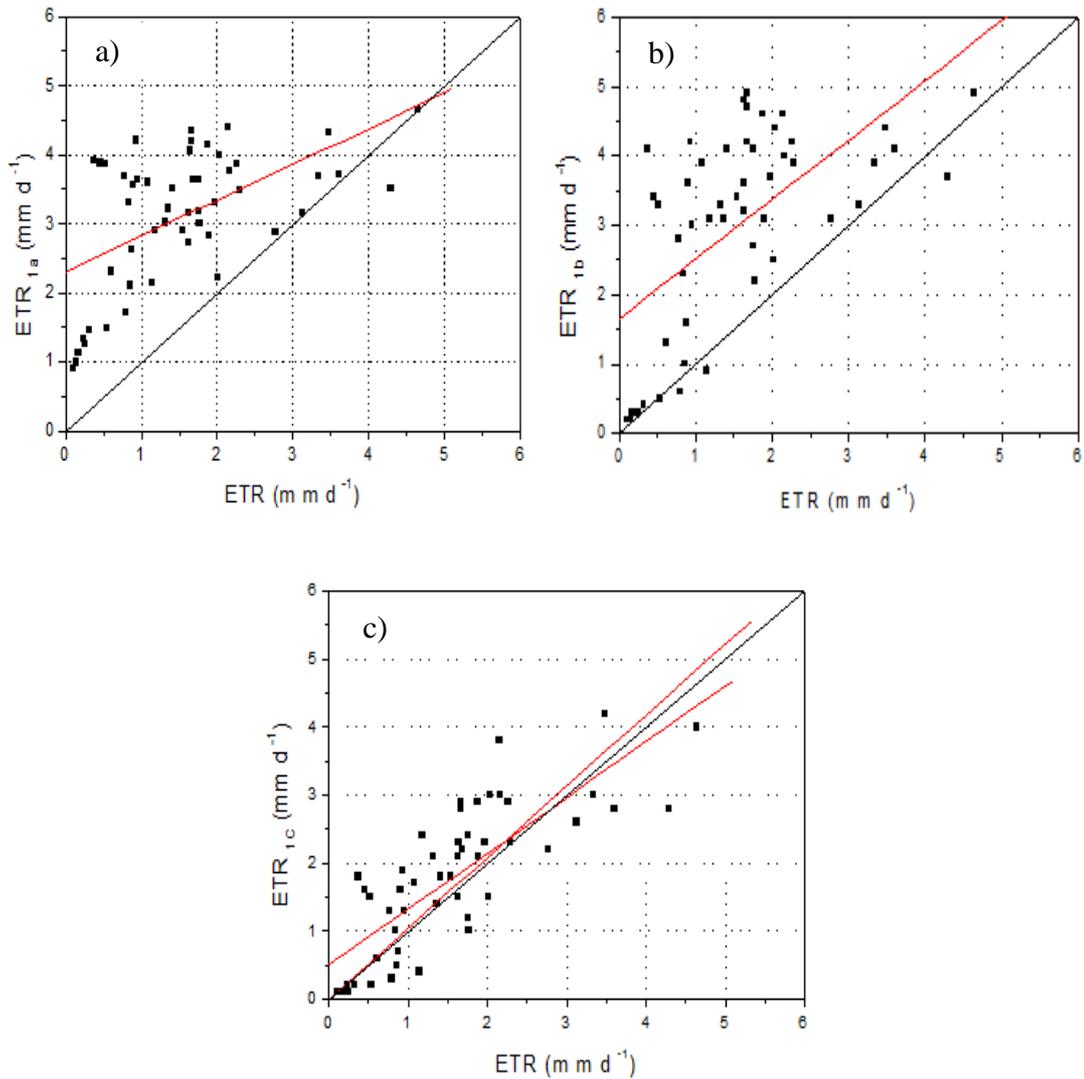


Figura 12. Relação entre a evapotranspiração real pelo balanço de água no solo ( $ETR_{BH}$ ) e a evapotranspiração pelo método do coeficiente simples ( $ETR_I$ ) para um cultivo de milho em Arapiraca - AL no período de junho a setembro de 2005. Em que: a) Ks logarítmico ( $ETR_{1,a}$ ); b) Ks FAO56 ( $ETR_{1,b}$ ); c) Ks hiperbólico ( $ETR_{1,c}$ ).

A tendência de  $ETR_{1,b}$  foi também de sempre superestimar os valores observados, principalmente para o intervalo entre 0,8 e 2,5  $mm\ d^{-1}$ , com diferenças superiores a 75%. Para  $ETR_{BH}$  inferior a 0,6  $mm\ d^{-1}$ , as estimativas mostraram diferenças inferiores, e em torno de 45%. No caso de  $ETR_{BH}$  acima de 2,5  $mm\ d^{-1}$ , novamente os valores mostraram proximidade com a linha 1:1, com diferenças em média de 12,5%. Para o modelo  $K_{s,b}$  essas condições apresentaram valores de  $K_s = 1$ , e assim,  $ETR_{BH} = ETR$ . Resultado similar foi observado para as estimativas de  $ETR_{1,a}$ , o

que confirma que as estimativas para condições próximas da potencial, pelo método do coeficiente de cultivo simples, apresentaram resultados satisfatórios.

O último sub-modelo de Ks utilizado com método de ETc simples ( $ETR_{1,c}$ ) mostrou menor dispersão gráfica dos valores de  $ETR_{BH}$  no entorno da linha 1:1 (Figura 12c), com  $r^2$  de 0,5610. Pela análise de regressão linear, o valor da interceptação não apresentou diferenças estatísticas significativas de 0 ( $p < 0,05$ ), assim, avaliou-se a regressão força a passar pela origem sem prejuízo nas análises. Logo, o modelo linear reduziu-se a  $Y = bX$ , forçando a passagem da reta pela origem,  $a = 0$ . A não diferença significativa de  $b$  indicou que o erro sistemático nas estimativas de  $ETR_{BH}$  por esse modelo foi nulo. O coeficiente angular foi de 1,041, o que nesse caso indicou superestimativa de 4,1% em média dos valores de  $ETR_{BH}$ . O RQME foi de 0,71 mm d<sup>-1</sup> e representou apenas 4,6 % da média.

Em resumo, entre os métodos de determinação da evapotranspiração real,  $ETR_{1,c}$  foi o que apresentou valores mais próximos aos de  $ETR_{BH}$ .  $ETR_{1,a}$  e  $ETR_{1,b}$  apresentaram tendências análogas entre si, com poucos dias se aproximando dos valores de  $ETR_{1,c}$ , e com raras exceções, subestimaram os valores de  $ETR_{BH}$ . As diferenças entre esses resultados foram devido principalmente ao método de determinação de Ks.

#### 4.1.2 Modelo de Penman-Monteith Original

Os valores mínimos, médios e máximos de  $ETR_2$  e  $ETR_{BH}$  estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Valores mínimos, médios e máximos de  $ETR_2$  e  $ETR_{BH}$ . Em detalhes os dias após o plantio nos quais os valores foram observados.

	Mínimo (mm.dia <sup>-1</sup> )	DAP	Médio (mm.dia <sup>-1</sup> )	Máximo (mm.dia <sup>-1</sup> )	DAP
$ETR_{2,a}$	0,80	125	4,81	8,04	109
$ETR_{2,b}$	0,08	125	1,62	4,56	63
$ETR_{2,c}$	0,08	125	1,79	5,20	63
$ETR_{BH}$	0,11	125	1,54	4,64	85

A Figura 13 ilustra a variação durante o ciclo da cultura de  $ETR_2$  estimada pelo modelo de Penman-Monteith original acoplado aos sub-modelos de resistência da

cultura (rc) ( $ETR_{2a}$ ,  $ETR_{2b}$  e  $ETR_{2c}$ ) e  $ETR_{BH}$ . A  $ETR_{2a}$  média ( $4,81 \pm 1,85 \text{ mm d}^{-1}$ ) superestimou em 73 % a média observada, enquanto os valores de  $ETR_{2b}$  ( $1,62 \pm 1,12 \text{ mm d}^{-1}$ ) e  $ETR_{2c}$  ( $1,79 \pm 1,28 \text{ mm d}^{-1}$ ) foram próximos de  $ETR_{BH}$  ( $1,54 \pm 1,06 \text{ mm d}^{-1}$ ), com diferenças de inferiores a 16,2 %. Os valores máximos de  $ETR_{BH}$  em função dos sub-modelos de resistência da cultura foram de  $8,04 \text{ mm d}^{-1}$  para  $ETR_{2a}$  (109 DAP),  $5,20 \text{ mm d}^{-1}$  para  $ETR_{2c}$  (63 DAP) e  $4,56 \text{ mm d}^{-1}$  para  $ETR_{2b}$  (63 DAP). Novamente, como observada nas estimativas de  $ETR_1$  - método do Kc simples - os máximos não coincidiram com  $ETR_{BH}$  máxima. Em relação aos valores mínimos estimados,  $ETR_{2a}$  ( $0,80 \text{ mm d}^{-1}$ ) apresentou maior incoerência em relação aos valores de  $ETR_{BH}$  ( $0,11 \text{ mm d}^{-1}$ ), com superestimativa de mais de 7 vezes. O valor mínimo de  $ETR_{2b}$  e  $ETR_{2c}$  foram iguais ( $0,08 \text{ mm d}^{-1}$ ) e ocorreram no mesmo dia (125 DAP), sendo de 26 % inferior a  $ETR_{BH}$ . É notório que os valores de  $ETR_{2a}$  superestimaram os valores de  $ETR_{BH}$  em todo o ciclo de desenvolvimento, no entanto os valores de  $ETR_{2b}$  e  $ETR_{2c}$  apresentaram boa correlação com os valores observados.

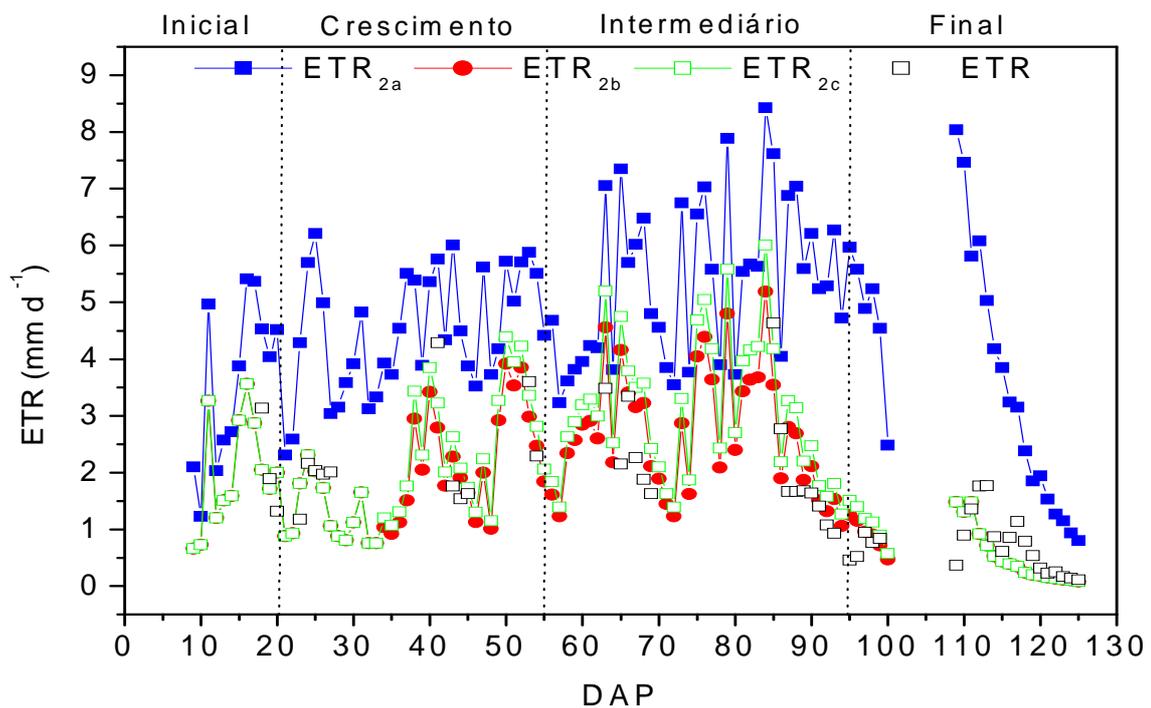


Figura 13. Estimativa da evapotranspiração real para um cultivo de milho em Arapiraca - Alagoas pelo método de Penman-Monteith original, utilizando rc proposto por Ortega-Farias ( $ETR_{2a}$ ), Monteith ( $ETR_{2b}$ ), média dos valores medidos pelo IRGA ( $ETR_{2c}$ ) e a evapotranspiração real pelo balanço de água no solo (ETR).

Observando as correlações entre os valores de  $ETR_{BH}$  e  $ETR_{2,a}$  (Figura 14a) verifica-se que não houve tendência das estimativas seguirem a linha de valores 1:1. O valor do coeficiente de determinação (0,2692) foi inferior ao de todos os modelos e suas variações avaliados no presente trabalho, o que indicou elevada dispersão das estimativas. O intercepto foi elevado e de  $3,41 \text{ mm d}^{-1}$ , enquanto que o coeficiente angular da reta foi próximo de 1 (0,9071). A análise estatística através da RQME confirmou que a discrepância dos valores desse modelo em relação aos valores de  $ETR_{BH}$ , impossibilita o seu uso para o local de estudo. O valor da RQME foi de  $3,62 \text{ mm dia}^{-1}$ , que representou 235 % da  $ETR_{BH}$ .

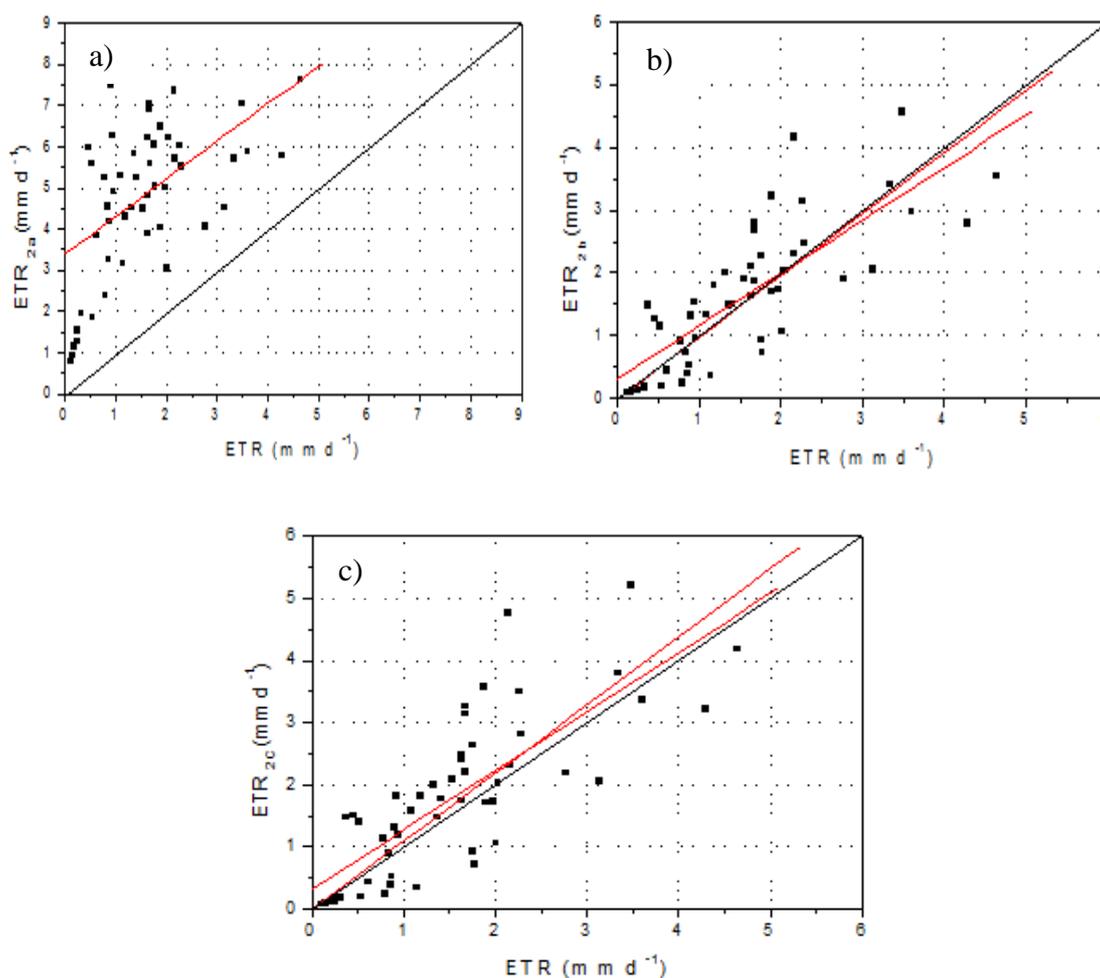


Figura 14. . Relação entre a evapotranspiração real pelo balanço de água no solo ( $ETR_{BH}$ ) e a evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith original ( $ETR_2$ ) para um cultivo de milho em Arapiraca - AL no período de junho a setembro de 2005. Em que: a) rc - Ortega-Farias ( $ETR_{2,a}$ ); b) rc - Allen et AL., 1998 ( $ETR_{1,b}$ ); c) rc - IRGA ( $ETR_{1,c}$ ).

Nas estimativas de  $ETR_2$  - modelo de Penman-Monteith original com as resistências estomáticas parametrizadas pelo IAF - considerou-se  $K_s$  hiperbólico ( $K_{s,c}$ ) por esse apresentar melhores resultados. A Figura 14b apresenta a correlação entre os valores de  $ETR_{2,b}$  e  $ETR_{BH}$ . Verificou-se tendência dos pontos seguirem a linha de valores iguais (1:1), com  $r^2$  foi de 0,6020. Pela análise de regressão, o intercepto foi não significativo estatisticamente ( $p < 0,05$ ), de forma similar a  $ETR_{1,c}$ . Assim, considerou na análise a regressão forçada a passar na origem ( $a = 0$ ). O coeficiente angular foi próximo ao valor ideal e de 0,981, ou seja, subestimativa média inferior a 2%. As estimativas baseadas nesse sub-modelo foram melhores para os valores abaixo de  $2 \text{ mm d}^{-1}$ , ocorrendo dispersão maior dos valores superiores  $2 \text{ mm d}^{-1}$ . O valor da RQME foi de 0,70, representando assim, 45 % da média de  $ETR_{BH}$ .

A relação entre  $ETR_{2,c}$  e  $ETR_{BH}$  mostrou resultados similares a relação anterior, com coeficientes de determinação de 0,595 e intercepto com diferenças não significativas estatisticamente ( $p < 0,05$ ).  $ETR_{2,c}$  mostrou baixa dispersão e valores próximos a linha 1:1 (Figura 14c). O coeficiente angular da reta indicou que a tendência geral do modelo é de superestimativa de aproximadamente de 9,3% de  $ETR_{BH}$ . O RQME foi de  $0,82 \text{ mm d}^{-1}$ , sendo de 53% da média.

Na Tabela 14 estão apresentados os valores médios, de ETR pelos métodos avaliados no presente trabalho e os valores observados, e seus respectivos desvios padrões, RQME, os coeficientes - linear e angular - da reta e os valores de  $R^2$ .

O consumo hídrico para o cultivo de milho, estimado pelos modelos de evapotranspiração real, que apresentaram melhores correlações com os valores observados, teve uma variação em torno de 11 % entre o valor mínimo ( $209,8 \text{ mm}$ ,  $ETR_{2,b}$ ) e o máximo ( $232,8 \text{ mm}$ ,  $ETR_{2,c}$ ). O valor médio foi de  $221,3 \text{ mm}$ , o que resultou em um consumo médio diário de aproximadamente  $1,8 \text{ mm}$ . O valor acumulado de  $ETR_{1,c}$  ( $231,6 \text{ mm}$ ) para todo o ciclo foi inferior a 1% de  $ETR_{2,c}$ . Independente dos sub-modelos supracitados, o maior consumo hídrico se deu na fase intermediária, sendo os valores de  $ETR_{1,c}$ ,  $ETR_{2,b}$  e  $ETR_{2,c}$  de  $112,8$ ,  $106,8$  e  $122,6 \text{ mm}$ , respectivamente. O valor médio para essa fase foi de  $114,7 \text{ mm}$ , resultando em um consumo médio diário de  $2,8 \text{ mm}$ . O maior consumo hídrico nessa fase pode ser atribuído principalmente aos estádios de polinização, florescimento e enchimento de grãos. A fase fenológica que apresentou consumo hídrico mais baixo foi a final, sendo os valores de  $ETR_{1,c}$ ,  $ETR_{2,b}$  e  $ETR_{2,c}$  de  $16,2$ ,  $13,0$  e  $14,0 \text{ mm}$ , respectivamente. O consumo hídrico na fase inicial oscilou entre  $24,0 \text{ mm}$  ( $ETR_{2,b}$  e  $ETR_{2,c}$ ) e  $28,7 \text{ mm}$

(ETR<sub>1,c</sub>), enquanto que na fase de crescimento os valores de ETR<sub>1,c</sub>, ETR<sub>2,b</sub> e ETR<sub>2,c</sub> foram respectivamente, 73,8, 65,7 e 72,0 mm.

Tabela 11. Média aritmética e desvio padrão da evapotranspiração real pelo balanço de água no solo e estimada i) método do coeficiente simples, utilizando várias formas de ponderar a variabilidade de água no solo (Ks) e ii) método de Penman-Monteith original, utilizando diferentes métodos para obtenção da resistência da cultura, Quadrado médio do erro, intercepto (a) e coeficiente angular (b) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) da regressão linear entre os valores estimados e medidos, para os métodos avaliados

Método	Média mm d <sup>-1</sup>	Desvio Padrão mm d <sup>-1</sup>	RQME mm d <sup>-1</sup>	a mm d <sup>-1</sup>	b	R <sup>2</sup>
ETR	1,54	1,06				
ETR <sub>1,a</sub>	3,31	0,99	1,83	2,31	0,519	0,3067
ETR <sub>1,b</sub>	2,98	1,47	1,84	1,65	0,859	0,3806
ETR <sub>1,c</sub>	1,77	1,08	0,71	-	1,041	0,5610
ETR <sub>2,a</sub>	4,81	1,85	3,62	3,41	0,907	0,2692
ETR <sub>2,b</sub>	1,62	1,12	0,70	-	0,981	0,6020
ETR <sub>2,c</sub>	1,79	1,28	0,82	-	1,093	0,5950

## 5. CONCLUSÕES

Com embasamento nos resultados apresentados para a evapotranspiração real da cultura do milho nas condições edafoclimáticas de Arapiraca - AL, conclui-se que:

Dos métodos de determinação do coeficiente de redução de água no solo ( $K_s$ ) utilizados no método do coeficiente de cultivo simples ( $ETR_1$ ), apenas o coeficiente de redução de água no solo hiperbólico apresenta estimativas de ETR satisfatórias.

O modelo de Penman-Monteith original mostra resultados satisfatórios, apenas quando a resistência da cultura é parametrizada pelo índice de área foliar associada ao coeficiente de redução de água no solo hiperbólico, sobressaindo-se quando a resistência foliar a difusão de vapor d'água ( $r_s = 100 \text{ s m}^{-1}$ ) sugerida Monteith (1965).

A evapotranspiração do milho começa a ser penalizada quando o conteúdo de água no solo fica abaixo do conteúdo de água na capacidade de campo e não apenas abaixo da água facilmente disponível.

O maior consumo hídrico pela superfície do dossel, com base nas estimativas dos sub-modelos que apresentaram melhores correlações com os valores observados ( $ETR_{1,c}$ ,  $ETR_{2,b}$  e  $ETR_{2,c}$ ), ocorreu entre a polinização e o florescimento – fase Intermediária.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. L. T. **Viabilidade e Manejo da Irrigação da Cultura do Milho**. Sete Lagoas - MG, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. 12 p. (EMBRAPA, Circular Técnica 85, ISSN 1679-1150).

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 1998. 300 p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper 56).

BARBANO, M. T., DUARTE, A.P., BRUNINI, O. Temperatura-base e acúmulo térmico no subperíodo semeadura-florescimento masculino em cultivares de milho no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.2, p. 261-268, 2001.

BARRETO, E. J. S.; SOUZA, J. L.; MOURA FILHO, G. ; CAVALCANTI, E. A. B.; SANTOS, E. A.; SILVA NETO, J. L. Avaliação térmica em cultivo de milho na região de tabuleiro costeiro de alagoas, ano 2000. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, III REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2001, FORTALEZA, **Anais... CE**, 2001.

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 657 p.

BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R. Teste de um modelo de estimativa do espigamento do milho com base na temperatura do ar. **Agronomia Sulriograndense**, v, 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

BIANCO, R. Pragas do milho e seu controle. In: **A cultura do milho no Paraná (Circular 68)**. Londrina – Fundação Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR, 1991. Pragas e seu Controle, p. 187-221.

Cardim A. H. **Caracterização da Estação de Cultivo em Alagoas: Análise Temporal e Espacial**. 2003. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Programa de pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2003.

CARVALHO, H. W. L.; CARDOSO, M. J.; SANTOS, D. M. **Recomendação de Cultivares de Milho para o Nordeste Brasileiro: ensaios realizados no ano agrícola de 2003/2004**. Aracaju: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2005. 6p. (EMBRAPA, Circular Técnica 40, ISSN 1678-1937).

CAVALCANTI, I. F. A., ABREU, M. A., SATYAMURTI, P. **Climanálise especial edição comemorativa de 10 Anos**. São José dos Campos: INPE, 1996. 235 p.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. **Influências da circulação de escala sinótica na circulação da brisa marítima na costa N-NE da América do Sul**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, nov. 1982. 13 p. (INPE-2573-PRE/221).

COELHO, A. M.; CRUZ, J.C.; PERREIRA FILHO, I.A. **Rendimento de milho do Brasil: chegamos ao máximo?** Piracicaba: Potafos, 2003. 12p. (Informações agronômicas, 101).

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS M. A. F.; NOBRE C. Environmental conditions associated with amazonian squall lines: A case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 11, p. 3163-3174, 1995.

CONAB – **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <[www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br)>. Acesso em 15 de jul. 2007.

Cowan, R. S. Swartzia (Leguminoide – Coesalpionioideae. Swartziae). **Flora Neotropical**, v. 1. 229 p. [Monograph I].

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: **Diagnóstico do Município de Arapiraca**. 25 p. Recife, 2005.

CRUZ, T. C.; MONTEIRO, J. A.; SANTANA, D. P.; GARCIA, J. L.; BAHIA, F. G. F. T. C.; SANS, L. M. A.; PERREIRA FILHO, I. A. **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 1996, 204p.

DOOREMBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 1997. 179 p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper 24).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Milho BR 106**. Disponível em: <<http://www.pnpms.embrapa.br/produtos/produtos/br106.html>>. Acesso em: 12 de nov. 2009.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Cultivo do Milho. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho/index.htm>>. Acesso em 15 de Nov. 2009.

Endres L.; Souza J. L.; Teodoro I.; Marroquim P. M. G.; Santos C.M.; Brito J. E. D. Gas Exchange Alteration Caused by Water Deficit During The Bean Reproductive Stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V. 14, n. 1, P. 11-16, 2010. Campina Grande/PB.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360p.

FANCELLI, A. L. Ecofisiologia de plantas de lavouras. In: CARLESSO et al. **Irrigação por Aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS, p.59-73, 2001.

FANCELLI, A. L. **Plantas Alimentícias: Guia para aula, estudos e discussão**. Centro Acadêmico “Luiz de Queiroz”. ESALQ/USP, 1986. 131p.

Ferreira Junior, R. A.; Souza, J. L.; Lyra, G. B.; Santos, M. A.; Abreu, M.L. Eficiência no uso da Radiação do Milho sob Diferentes Coberturas de Solo. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008, São Paulo. **Anais... XV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2008.

FERREIRA, N. J.; CHAN, C. S.; SATYAMURTI, P. Análise dos distúrbios ondulatório de leste sobre o oceano Atlântico Equatorial Sul. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 6., Salvador, 19-24 nov. 1990. **Anais... Rio de Janeiro, SBMet**, 1990, p. 462-466.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M. **Modelo para estimação da produtividade de grãos de milho no Estado de São Paulo**. 2004. 68p Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade Estadual de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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 calórica. **Scientia Agrícola**, v.57, n.3, p.377-383, 2000.

Garcia J. C.; Duarte J. O. Uma Safra Para Esquecer. **Zoonews**. Disponível em: [http://www.zoonews.com.br/exibir\\_noticias.php?a=view&idnoticia=163306&tipo=2](http://www.zoonews.com.br/exibir_noticias.php?a=view&idnoticia=163306&tipo=2). Acesso em 13 de dez. 2009.

GENUCHTEN, M. Van. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-8, 1980.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico: 2000**. Alagoas: IBGE, 2001. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: jan. 2010.

IOWA STATE UNIVERSITY. **Special report** n. 48. Ames, 1993. Disponível em: <[www.maize.agron.iastate.edu/corngrows.html](http://www.maize.agron.iastate.edu/corngrows.html)>. Acesso em 17 de out. 2009.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. **ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice**, Nº 70. ASCE, New York, 1990. 332 p.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 4, p. 488-498, 1980.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 36, n. 6, p. 538-551, 1981.

LYRA, G. B. ; ZOLNIER, S. ; SEDIYAMA, G. C. ; COSTA, L. C. ; SEDIYAMA, M. A. N. Resistência difusiva de superfície e estimativa de evapotranspiração para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico sob condições de casa-de-vegetação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 201-210, 2003.

LYRA, G. B.; SEDIYAMA, G. C.; LYRA, G.B; PEREIRA, A. R.; SOUZA, E. F. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de tabuleiros costeiros do estado de Alagoas: coeficiente da cultura “único” padrão boletim FAO-56. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 25, p. 40-43, 2007.

LOZADA, B.I.; ANGELOCCI, L.R. Efeito da temperatura do ar e da disponibilidade hídrica do solo na duração de subperíodos e na produtividade de um híbrido de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p. 37-43, 1999

MADDONNI G. A.; OTEGUI M.E Leaf área, light interception, and crop development in maize. **Field Crops Research**, v. 48, p. 81-87, 1996.

MATOS, E. H. **Dossiê Técnico: Cultivo do Milho Verde**. CDT/UnB, Brasília, 2007, 24p. Disponível em <<http://sbtrv1.ibict.br/upload/dossies/sbrt-dossie190.pdf>> Acesso em: 12 dez. 2009.

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. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de pós-graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2009.

MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions Royal**. London, B 281, p. 277-294, 1977.

MONTEITH, J.L., 1965. Evaporation and the environment. XIX. Symposia of the Society for Experimental Biology. In: **The State and Movement of Water in Living Organisms**. University Press, Swansea, Cambridge. p. 205–234

MONTGOMERY, E.G. **Correlation studies of com. Annual report**. Nebraska - Agricultural Experiment Station, v. 24, p. 108-159, 1911.

MTUI, T. A.; KANEMASU, E. T., WASSON, C. Canopy temperatures, water use, and use efficiency of corn genotypes. **Agronomy Journal**. v. 73, p. 639-643, 1981.

NOILHAN, J.; PLANYON, S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. **Monthly Weather Review**. v. 117, p. 536 – 549, 1989.

NOLDIN, J. A. **Rendimento de grãos, componentes do rendimento e outras características de planta de três cultivares de milho em duas épocas de semeadura**. 1985. 149f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Curso de Pós-graduação em Agronomia, UFRGS.

OLIVEIRA, A. S. de **Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia**. (Dissertação de Mestrado em Meteorologia) INPE, São José dos Campos, 1986. 115 p. (INPE-4008-TDL/239).

Ortega-Farías, S.; Calderon R.; Martelli, N.; Antonioletti, R. Evaluacion de un modelo para estimar la radiacion neta sobre un cultivo de tomate industrial.

**Agricultura Técnica**, Chile. v.64, n.1, p.41-49, 2004. Disponível em:

<[http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0365-](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0365-28072004000100005&script=sci_arttext)

<[http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0365-28072004000100005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0365-28072004000100005&script=sci_arttext)>. Acesso em 24 de jun. 2009.

ORTEGA-FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; ENGLISH, M. Hourly reference evapotranspiration by Bower ratio and Penman methods. In: ALLEN, R. G.; VAN BAVEL, C. M. V. (Eds.) Management of Irrigation and Drainage Systems: Integrated Perspectives. New York: **American Society Civil Engineering**, 1993. P.969-976.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **The Royal Society**, London, v. 193, p. 120-145, 1948.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PERRY, L; SANDWEISS, D.H.; PIPERNO, D.R., RADEMAKER, K.; MALPASS, M.A.; UMIRE, A. e VERA, P. Early maize agriculture and interzonal interaction in southern. **Nature**, Peru, v.440. p. 76–79, mar. 2006.

RATISBONA, C. R. The climate of Brazil. In: Climates of Central and South America. World Survey of Climatology, **Elsevier**, v.12, p. 219-293, 1976.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Manole, São Paulo. 1987, 188 p.

SAAD, A. M. **Uso do tensiômetro no controle da irrigação por pivô central**. Piracicaba. ESALQ/USP, 1991. 141p. (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P.. **Cultivo do milho clima e solo**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho/c lima.htm>>. Acesso em: 02 de set. 2009.

SANTIAGO, A. V. **Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), na escala mensal e decenal**. 2001. 37 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

SILVA, C. L. A.; RAMOS, M. M, FERREIRA, P. A.; SEDIYAMA, G. C.; LOUREIRO, B. T. Modelagem da precipitação efetiva na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 6, p. 929-937, 1994.

SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G. Ecofisiologia e fenologia das culturas do milho e do sorgo. In: PARFITT, J. M. B. **Produção de milho e sorgo na várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2000. p. 07-18.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.

SOUZA, J. L. Agrometeorologia aplicada à fruticultura no estado da Alagoas. In: **Relatório Técnico**. Maceió: UFAL / FAPEAL, 2001, 86 p.

SOUZA L. S. B.; MOURA M. S. B.; SILVA T. G. F.; SOARES J. M.; BRANDÃO E. O. Caracterização térmica do feijão-caupi e do milho em sistema de plantio consorciado nas condições do semi-árido nordestino. In: **Jornada de Iniciação Científica** da Embrapa Semi-Árido, 2007.

Teodoro I. **Avaliação de Evapotranspiração e Desenvolvimento da Cultura do Milho Irrigado, na Região de Rio Largo. 2003**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2003.

THORNNTWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Laboratory of climatology, 1955.104 p.

UVO, C. R. B.; NOBRE, C. A. A zona de convergência intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte II: A influência dos ventos e TSM do Atlântico Tropical. **Climanálise**, v. 4, n. 10, p. 39-47, 1989.

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

Warrington, I.J., and E.T. Kanemasu. Corn growth response to temperature and photoperiod I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. **Agronomy Journal**, v. 75, p. 749–754.

WEISSMANN M. Fases de Desenvolvimento da Cultura do Milho. Culturas: Safrinha e Inverno. **Tecnologia e Produção – Milho Safrinha e Culturas de Inverno**, p. 31-38, 2008.