



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



COMPONENTES DO BALANÇO DE ÁGUA E DE RADIAÇÃO SOLAR NO DESENVOLVIMENTO DO MILHO, EM QUATRO ÉPOCAS DE SEMEADURA, NO AGRESTE DE ALAGOAS

Rui Palmeira Medeiros

RIO LARGO/AL,
2009

RUI PALMEIRA MEDEIROS

**COMPONENTES DO BALANÇO DE ÁGUA E DE RADIAÇÃO
SOLAR NO DESENVOLVIMENTO DO MILHO, EM QUATRO
ÉPOCAS DE SEMEADURA, NO AGRESTE DE ALAGOAS**

Dissertação apresentada ao colegiado do curso de Pós-graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

Orientação: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza

Co-orientação: Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra

Co-orientação: Prof. Dr. Antônio Dias Santiago

RIO LARGO, AL
2009

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Janaina Xisto de Barros Lima

M488c Medeiros, Rui Palmeira.
 Componentes do balanço de água e de radiação solar no desenvolvimento do milho, em quatro épocas de semeadura, no agreste de Alagoas / Rui Palmeira Medeiros, 2009.
 88f.

Orientador: José Leonaldo de Souza.
Co-Orientador: Guilherme Bastos Lyra.
Dissertação (mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2009.

Bibliografia: f. 82-88.

1. Milho – Cultura – Alagoas. 2. Genética vegetal – Milho. 3. *Zea mays* L. 4. Evapotranspiração. 5. Radiação solar. I. Título.

CDU: 633.15 (813.5)

TERMO DE APROVAÇÃO

RUI PALMEIRA MEDEIROS

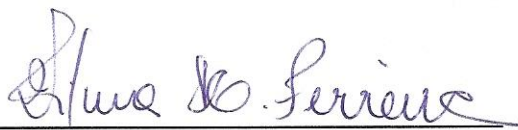
COMPONENTES DO BALANÇO DE ÁGUA E DE RADIAÇÃO SOLAR NO DESENVOLVIMENTO DO MILHO, EM QUATRO ÉPOCAS DE SEMEADURA, NO AGRESTE DE ALAGOAS

Esta dissertação foi submetida a julgamento como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Agronomia, outorgado pela Universidade Federal de Alagoas.

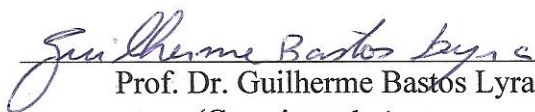
A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.



Prof. Dr. Maurício Antônio Coelho Filho



Profª Draª Vilma Marques Ferreira



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



Dr. Antonio Dias Santiago
(Co-orientador)



Prof. Dr. José Leonaldo de Souza
(Orientador)

Aprovado em 26 de junho de 2009

A Deus, que me concedeu o dom da vida e forças para vencer; à minha esposa Marly, aos meus filhos Daniel Isaac, Ciro Gustavo e Israel Lucas, ao meu neto Luis Otávio, às minhas noras e a todos aqueles que estiveram presentes em força e pensamento;

DEDICO

Aos que, como eu, acreditam que a verdadeira revolução não é feita para a conquista de bens materiais, mas pela igualdade de oportunidades e democratização do conhecimento,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Dr. José Leonaldo de Souza, pelos ensinamentos, amizade, respeito, confiança, dedicação e estímulo nos momentos difíceis;

Aos professores Dr. Gustavo Bastos Lyra e Dr. Gilson Moura Filho pelas instruções e sugestões neste trabalho;

Ao Dr. Antônio Dias Santiago e ao Dr. Guilherme Bastos Lyra pelas inestimáveis contribuições nesse trabalho;

Ao coordenador da pós-graduação, Prof. Dr. Gaus Silvestre de Andrade Lima, pelo empenho para melhorar o curso de mestrado;

Aos colegas de laboratório Marcos Alex, Anthony Carlos, André Luiz, Eduardo Cabral e Mercel José, pela convivência e ajuda ;

Ao Prof. Dr. Maurício Antonio Coelho Filho, por ter aceitado o convite para fazer parte da banca examinadora;

Em especial, aos colegas e amigos José Edmilson Deodato de Brito, Ricardo Araújo e Cícero Teixeira da Silva Costa pela inestimável contribuição, na condução e elaboração desse trabalho;

Aos colegas de turma do mestrado: Alexandre Guimarães, Altanys Silva Calheiros, Cícero Teixeira da Silva Costa, José André Custódio, José Edmilson Deodato de Brito, Jorge Luís Xavier Cunha, pelo convívio;

Ao corpo docente do curso de Mestrado em Agronomia-Produção Vegetal da UFAL, em especial àqueles com os quais convivi: Prof. Dr^a. Vilma Marques Ferreira, Prof. Dr. Laurício Endres, Prof. Dr. Paulo Vanderlei Ferreira, Prof. Dr. José Vieira Silva, Prof. Dr. José Paulo Vieira, Prof. Dr. Gilson Moura Filho, Prof. Dr. José Calazans e Prof. Dr^a. Leila de Paula Resende pela generosidade e dedicação;

Ao Professor MS. Cícero Gomes do Campus Arapiraca, pelo apoio logístico através dos laboratórios daquela unidade de ensino;

À minha sobrinha e afilhada querida, Vitória Mayana e ao auxiliar de campo Elisson dos Santos, o “Nininho”, pela contribuição na condução do experimento;

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação, Geraldo Lima, Marcos e José Carlos do laboratório de Física de Solos;

A todos que acreditaram e me estimularam a encarar mais esse desafio;

Meus sinceros agradecimentos

BIOGRAFIA DO AUTOR

Rui Palmeira Medeiros, filho de Antônio Medeiros e Lúcia Palmeira Medeiros, nasceu na cidade de Traipu, Estado de Alagoas, em 27 de abril de 1956.

Ingressou na Universidade Federal de Alagoas para cursar Agronomia no primeiro semestre do ano de 1975, integrando a segunda turma de Agronomia da UFAL e em 21 de julho de 1979 foi graduado Engenheiro Agrônomo.

Durante sua vida acadêmica, desenvolveu atividades de monitoria na disciplina de Agricultura II por dois anos consecutivos. Iniciou a sua vida profissional na EMATER/AL em Santana do Ipanema/AL como extensionista local em 1979, permanecendo até 1982, sendo transferido para Arapiraca, onde constituiu família e reside até o presente. Durante a sua vida profissional participou de vários cursos de aperfeiçoamento e é especialista em irrigação pela Universidade Federal da Paraíba - Campus de Campina Grande/PB.

Ocupou os cargos de Assessor Técnico de irrigação, Supervisor Regional da EMATER/AL região do Agreste. Foi Secretário adjunto e titular da pasta da Agricultura do município de Arapiraca durante oito anos.

É cidadão honorário de Arapiraca e participou como membro titular e secretário do Comitê de Bacias da Região Hidrográfica do Rio Piauí. Foi conselheiro e presidente do Conselho Municipal de Desenvolvimento Rural desse município.

Em março de 2007, retornou à academia iniciando o Curso de Mestrado em Agronomia, concentração em Produção Vegetal, na Unidade Acadêmica do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

“O valor das coisas não está no tempo em que elas duram, mas na intensidade com que acontecem; Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis.”

(Fernando Pessoa)

RESUMO

Fatores ambientais são determinantes nos processos fisiológicos das plantas de milho, no acúmulo de matéria seca e no rendimento da cultura. O objetivo desse trabalho foi avaliar as interações entre as variáveis ambientais com o crescimento, desenvolvimento e produtividade do milho (*Zea mays* L.) em quatro épocas de semeaduras, com destaque para a eficiência no uso da radiação e da água. Para tanto, um experimento de campo foi conduzido na região de Arapiraca, (09°48'55,1" S, 36°36'22,8" W e altitude de 236 m), Alagoas Brasil. O experimento foi conduzido, durante a estação chuvosa, de maio a outubro de 2008 com quatro épocas de semeadura. A primeira época de semeadura (T1) ocorreu no dia 06 de maio, a segunda (T2) no dia 19 de maio, a terceira no dia 10 de junho e a quarta no dia 30 de junho de 2008, utilizando a variedade Al Bandeirante. Os elementos meteorológicos foram medidos através de sensores, instalados na estação meteorológica localizada na área contígua ao experimento e os dados de umidade do solo foram capturados através de sensores, utilizando a reflectometria no domínio do tempo (TDR), coletadas durante a estação de crescimento da cultura. A evapotranspiração de referência (ET_o), a evapotranspiração da cultura (ET_c) e a evapotranspiração real (ET_r) foram estimadas pela metodologia definida no Boletim FAO-56. A análise das interações agrometeorológicas do milho mostraram que a taxa de crescimento da cultura (TCC) em g m⁻² dia⁻¹, o índice de área foliar (IAF) no estágio fenológico de grãos farináceos (R4) e a produtividade de grãos foram menores na última época de semeadura (T4), quando comparadas às demais épocas (T1, T2 e T3). Já os valores da área foliar específica (AFE) não apresentaram diferenças entre si, para as quatro épocas de semeadura. A evapotranspiração real (ET_r) variou de 356 mm, na primeira época de semeadura (T1) a 229,6 mm na última época (T4), enquanto a eficiência no uso da água (EUA) esteve no intervalo de 4,28 kg m⁻³ na terceira época (T3) a 3,76 kg m⁻³ de matéria seca, na quarta época de semeadura (T4). Na primeira época de semeadura (T1), verificou-se uma eficiência no uso da radiação (EUR) de 4,61 g de massa seca por MJ m⁻² de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}), enquanto a quarta época (T4), contabilizou 2,98 g de massa seca por MJ m⁻² de RFA_{abs}, sendo 35,4% menor que T1. Diante das observações conclui-se que a menor produtividade foi verificada no tratamento T4, decorrente das modificações morfofisiológicas, ocorridas nas plantas de milho, causadas pelas alterações ambientais.

Palavras-chaves: Milho, eficiência no uso da radiação, Evapotranspiração, eficiência no uso da água, produtividade e componentes da produção.

ABSTRACT

Environmental factors are crucial in physiological processes of maize in the dry matter accumulation and crop yield. The aim of this study was to evaluate the interactions between environmental variables with growth, development and yield of maize (*Zea mays* L.) at four sowing times, with emphasis on efficiency in the use of radiation and water. Thus, a field experiment was conducted in the region of Arapiraca (09°48'55.1 "S, 36°36'22, 8" W, 236m), Alagoas, Brazil. The experiment was conducted, led during the rainy season, from May to October 2008, with four growing seasons. The first sowing time (T1) occurred on May 6th, 2008, the second (T2) on May 19th, 2008, the third (T3) on June 10th, 2008 and fourth (T4) on June 30th, 2008, using a variety Al Bandeirante. The weather data were measured by sensors installed in the meteorological station located in the area adjoining the experiment and the soil moisture data were captured through sensors using time domain reflectometry (TDR), collected during the growth season culture. Reference evapotranspiration (ET_o), crop evapotranspiration (ET_c) and evapotranspiration (ET_r) were estimated by the methodology set out in FAO-56 bulletin. A meteorological analysis of the interactions of corn showed that the crop growth rate of (CGR) in $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, the leaf area index (LAI) in the developmental stage of grain flour (R4) and grain yield were lower the last sowing date (T4) when compared to other periods (T1, T2 and T3). Have the values of specific leaf area (SLA) did not differ among themselves, for the four seasons. The actual evapotranspiration (ET_r) ranged from 356 mm at the first sowing time (T1) to 229.6 mm in the last season (T4), while the water use efficiency (WUE) was in the range of 4.28 kg m^{-3} the third time (T3) to 3.76 kg m^{-3} dry in the fourth season of sowing (T4). In the first sowing time (T1), there was a radiation use efficiency (RUE) of 4.61 g dry mass m^{-2} per MJ photosynthetically active radiation absorbed (PAR_{abs}), while the fourth time (T4) accounted for 2.98 $\text{g dry matter per MJ m}^{-2}$ PAR_{abs}, being 35.4% lower than T1. Given the observations it is concluded that the lowest yield was observed in T4, morphological and physiological changes resulting from, occurring in maize plants caused by environmental change.

Keywords: Maize, radiation use efficiency, evapotranspiration, water use efficiency, yield and yield components.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Granulometria ⁽¹⁾ (areia, silte e argila) e classe textural nas profundidades de 0 a 120 cm.....	34
Tabela 2. Estádios vegetativos e reprodutivos da planta de milho.....	38
Tabela 3. Valores de n , m , α , θ_r , θ_s e R^2 encontrados para a equação de van Genuchten para as camadas de solo de 0,0 a 0,3 e 0,3 a 0,6 m de profundidade de solo.....	43
Tabela 4. Valores dos coeficientes a , b , c e R^2 encontrados para a equação polinomial para as camadas de solo de 0,0 a 0,3 e 0,3 a 0,6 m de profundidade de solo.....	45
Tabela 5. Dados da precipitação pluvial total, ciclo da cultura, número de dias com chuva, frequência de precipitação e intensidade de precipitação para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4) na estação de crescimento da cultura.....	55
Tabela 6. Datas de semeadura, colheita e valores de Kcb corrigidos para os quatro tratamentos em função da umidade relativa mínima média e velocidade média do vento.....	56
Tabela 7. Valores da Evapotranspiração da cultura (ETc), Evapotranspiração real (ETr), evaporação (E), transpiração (T), radiação Global (Rg) e precipitação pluvial (P) no ciclo de cultivo para as quatro épocas de semeadura de milho (T1, T2, T3 e T4). .	61
Tabela 8. Intervalos em dias após a semeadura (DAS) e graus dia acumulados °C, (GDA) para cada fase fenológica de plantas de milho para as quatro épocas de plantio (T1, T2, T3 e T4).....	65
Tabela 9. Partição de massa seca (g planta^{-1}), de plantas de milho no estágio fenológico R1, para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).	67
Tabela 10. Partição de massa seca (g planta^{-1}), de plantas de milho no estágio fenológico R4, para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).	68
Tabela 11. Médias de IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) de plantas de milho para os estádios fenológicos de três folhas (V3), seis folhas (V6), oito folhas (V8), 12 folhas (V12), antese (R1) e grãos farináceos (R4), para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).	70
Tabela 12. Médias de área foliar específica (AFE) de plantas de milho para os estádios fenológicos de três folhas (V3), seis folhas (V6), oito folhas (V8), 12 folhas (V12), antese (R1) e grão farináceo (R4) e radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA) acumulada para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).....	71
Tabela 13. Taxa de crescimento da cultura (TCC) em $\text{g m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ em seis estádios fenológicos de plantas de milho em quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).	73

Tabela 14. Eficiência no uso da água (kg m^{-3}) para plantas de milho em seis estádios fenológicos (V3, V6, V8, V12, R1, R4 e R5) para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).	74
Tabela 15. Evapotranspiração real (mm), consumo de água ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), rendimento de grãos (kg ha^{-1}), eficiência no uso da água, EUA, (kg m^{-3}) para a matéria seca total e eficiência no uso da água (kg m^{-3}) para o rendimento EUA _r , de plantas de milho submetidas a quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).	75
Tabela 16. Eficiência no uso da radiação ($\text{g MS MJ}^{-1} \text{m}^{-2}$) para plantas de milho em quatro épocas de semeadura para sete estádios fenológicos (V3 a R5).	77
Tabela 17. Radiação solar fotossinteticamente ativa, RFA, (MJ m^{-2}) para os estádios fonológicos R1 (antese) e para todo o período de crescimento (R6) para quatro épocas de semeadura de milho (T1, T2, T3 e T4).....	78
Tabela 18. Médias dos atributos da produção e das características das plantas de milho para a quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participação percentual dos principais municípios alagoanos na área colhida com milho, em 2003 (CUENCA et al. 2005).....	22
Figura 2. Vista geral do experimento observando-se as diferenças de porte das plantas em função das diferentes épocas de semeadura.	37
Figura 3. Vista do monólito recortado na trincheira e sistema radicular do milho sobre a tábua com pregos, após a retirada do solo.	40
Figura 4. Amostragem de solo para calibração das leituras do TDR. A) sonda de coleta das amostras; B) coleta das amostras e C) acondicionamento do solo em latas de alumínio plastificadas, para envio ao laboratório.	44
Figura 5. Curva de Calibração da umidade volumétrica do solo (θ) obtida por gravimetria em relação ao período (P) da onda do refletômetro em micro segundos. A) profundidade de 00 a 0,30 m e B) profundidade de 0,30 a 0,60 m.	45
Figura 6. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa (RFA, MJ m^{-2}) e Radiação global (R_g , MJ m^{-2}) ($y = 0,423 (\pm 0,0017)x$, $r^2 = 0,99$), na região de Arapiraca-AL.	52
Figura 7. Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) média diária, diurna, noturna e amplitude térmica, em função dos dias após a emergência (DAE) para as quatro épocas de semeadura [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e T4 30/06/08 (D)] e fases fenológicas do milho (VE a V6).	54
Figura 8. Coeficiente de cultura basal (K_{cb}), coeficiente de cultura ajustado ($K_{c_{ajust}}$) e precipitação pluvial menos o escoamento superficial (P-RO) em função dos dias após a emergência (DAE) e dos estádios fenológicos do milho (VE a R6) para quatro épocas de semeadura de milho [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e T4 30/06/08 (D)].	58
Figura 9. Precipitação pluvial (P), evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração real (ET_r), Evaporação (E) e transpiração (T) para quatro épocas de semeadura [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e T4 30/06/08 (D)].	60
Figura 10. Armazenamento de água no solo (mm), RFA e RFA_{abs} (MJ m^{-2}), em função dos dias após a emergência (DAE) para quatro épocas de semeadura de milho [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e T4 30/06/08 (D)].	63
Figura 11. Matéria seca acumulada por partes da planta em % do total, em função dos estádios fenológicos (VE a R6) e dias após a emergência (DAE), para as quatro épocas de	

semeadura, [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e	T4 30/06/08
(D)].	66
Figura 12. Índice de área foliar (IAF) nos estádios fenológicos VE, V6, V14, R2 e R6 de plantas de milho para quatro épocas de semeadura, (T1, T2, T3 e T4) em função dos dias após a emergência (DAE)	69
Figura 13. Área foliar específica ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$) do milho para quatro épocas de semeadura correspondentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4.	72
Figura 14. Relação entre a produção de massa seca acumulada total (MS, kg ha^{-1}), e o consumo de água ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$), do milho semeado em quatro épocas: tratamento T1 ($y = 3,98x$, $r^2 = 0,95$), tratamento T2 ($y = 4,09x$, $r^2 = 0,97$), tratamento T3 ($y = 4,28x$, $r^2 = 0,96$), tratamento T4 ($y = 3,76x$, $r^2 = 0,93$), na região de Arapiraca-AL	75
Figura 15. Relação entre a produção de massa seca acumulada total (MS, g m^{-2}) do milho e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (RFAabs, MJ m^{-2}), semeado em quatro épocas: tratamento T1 ($y = 4,61x$, $r^2 = 0,99$), tratamento T2 ($y = 4,03x$, $r^2 = 0,99$), tratamento T3 ($y = 3,74x$, $r^2 = 0,99$), tratamento T4 ($y = 2,98x$, $r^2 = 0,98$), na região de Arapiraca-AL.	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 Características botânicas e fisiológicas.....	18
2.2 Fenologia	19
2.3 Importância econômica e social	21
2.4 Elementos do clima e produtividade.....	23
2.5 Balanço hídrico do solo.	26
2.6 Evapotranspiração.	30
2.7 O déficit hídrico	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 Localização e Características da Área Experimental	34
3.2 Tratamentos e delineamento experimental	35
3.3 Implantação e condução do experimento de campo.....	35
3.4 Crescimento e desenvolvimento da planta	37
3.4.1 Estádios fenológicos.....	37
3.4.2 Variáveis de crescimento.....	38
3.5 Variáveis agrometeorológicas.....	40
3.6 Caracterização físico-hídrica.....	41
3.6.1 Umidade do solo.....	41
3.6.2 Evapotranspiração	46
3.7 Eficiência no uso da água.....	50
3.8 Eficiência no uso da radiação	51
3.9 Produtividade e componentes da produção	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Fatores Ambientais.....	53
4.2 Análise hídrica	56
4.2.1 Coeficiente de cultura basal (K_{Cb})	56
4.2.2 Coeficiente de cultura ajustado (K_{Cajust})	57
4.2.3 Evapotranspiração real (ET _r) e evapotranspiração da cultura (ET _c).	59
4.2.4 Armazenamento de água no Solo	62

4.3 Crescimento e desenvolvimento	64
4.3.1 Matéria seca.....	65
4.3.2 Índice de Área Foliar	68
4.3.3 Área Foliar específica.....	70
4.3.4 Taxa de crescimento da cultura	72
4.4 Eficiência no uso da água.....	73
4.5 Eficiência no uso da Radiação	76
4.6 Produtividade e atributos da produção	78
5 CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

O milho é um dos principais cereais cultivados e consumidos em todo o mundo, devido à quantidade e à qualidade das reservas nutricionais acumuladas nos grãos. No Brasil, esse cereal é cultivado em todas as regiões, com destaque às regiões Sul, Sudeste e Centro-oeste, as quais representam a maior participação na produção total do país. No Nordeste, a maioria dos cultivos é efetuada em consórcio com outras culturas, com baixa aplicação de insumos e consequentemente, baixas produtividades.

O potencial de crescimento, desenvolvimento e rendimento do milho associam-se às características genéticas e as condições ambientais, o que leva a grandes discrepâncias entre os rendimentos obtidos e os rendimentos potenciais da cultura. Apesar do alto potencial produtivo, esse cereal apresenta elevada sensibilidade aos estresses bióticos e abióticos. Devido ao reduzido número de espigas por planta e a baixa capacidade e viabilidade de reposição de plantas, os cultivos necessitam de um bom planejamento para que as plantas possam maximizar o aproveitamento dos recursos ambientais durante o seu ciclo de produção.

A expressão do potencial produtivo de um genótipo (satisfeitas as necessidades nutricionais e fitossanitárias) está sob a égide das condições do meio ambiente. Dentre essas condições destacam-se, a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), a água no solo e a temperatura do ar, dependendo da disponibilidade e do aproveitamento pelas plantas. A radiação solar se constitui na principal fonte de energia para os processos biológicos, bioquímicos e fisiológicos que ocorrem nas plantas. Portanto, a produção de matéria seca está às expensas da quantidade de energia solar disponível no meio, na capacidade da planta em interceptá-la e na eficiência com que o vegetal converte energia radiante em energia química.

Um dos fatores de maior relevância na limitação do rendimento das culturas, em particular o milho, é o déficit hídrico. As depleções no armazenamento de água do solo a níveis que provocam estresse hídrico afetam, praticamente, todos os processos relacionados ao crescimento e desenvolvimento e, por consequência a expressão do rendimento da cultura. Ressalte-se que a maior parte das áreas cultivadas com milho no Brasil, é conduzida em condições de sequeiro e, portanto, dependentes das precipitações pluviais no período de cultivo. No Nordeste, em particular, nas áreas compreendidas entre o litoral e interior semi-árido, a ocorrência de períodos secos durante a estação chuvosa é comum, oferecendo riscos para a expressão do potencial produtivo do milho. Os solos mais arenosos apresentam baixa capacidade de retenção de água disponível (CAD) para as plantas, o que pode potencializar os efeitos da inconstância pluvial e do déficit hídrico.

A temperatura do ar determina a maioria das mudanças fenológicas nas plantas, e por consequência regem a duração do ciclo de cultivo. Essa variável agrometeorológica relaciona-se ao déficit de pressão de vapor da atmosfera e no deslocamento das camadas de ar, afetando a evapotranspiração da cultura. Os fenômenos bioquímicos da fixação de CO₂, através da fotossíntese (assim como a respiração) são afetados pela temperatura do ar, influenciando o acúmulo de matéria seca pela planta.

Vários trabalhos agronômicos vêm sendo desenvolvidos, na região Agreste de Alagoas, com o objetivo de avaliar a produtividade de cultivares de milho. No entanto, as pesquisas que abordam a relação entre o crescimento e desenvolvimento da cultura com as variáveis agrometeorológicas, ainda são escassas. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as interações entre as variáveis ambientais com o crescimento, desenvolvimento e produtividade do milho (*Zea mays* L.) em quatro épocas de semeaduras, com destaque para a eficiência no uso da radiação e da água.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Características botânicas e fisiológicas

O milho tem a sua origem na América e é largamente cultivado no mundo inteiro, sendo a espécie mais cultivada e produtiva e, se considerada individualmente, sua taxa de multiplicação é de 1:600 a 1:1000. Foi o primeiro cereal submetido a rápidas e importantes transformações tecnológicas em sua forma de cultivo (FORNASIERI FILHO, 2007).

Estruturalmente, a planta de milho é constituída por uma haste cilíndrica com nós e entrenós compactos. Cada nó, abaixo do solo, produz raízes e, acima do nível do solo, podem produzir perfilhos ou raízes adventícias. As folhas e as ramificações podem permanecer no estado rudimentar ou desenvolverem-se para produzir as inflorescências femininas (espigas). O colmo compacto termina na inflorescência masculina (pendão). As folhas são gradualmente expostas à medida que o colmo se alonga, porém o seu crescimento ocorre ainda, quando estas estão fechadas e são arranjadas alternadamente e suportadas pelas suas bainhas, que envolvem o colmo. Os limbos foliares são geralmente largos e planos, com superfície superior apresentando pelos. Na linha de união do limbo com a bainha forma-se uma linha semitransparente envolvendo o colmo, denominada lígula (FORNASIERI FILHO, 2007).

O sistema radicular é típico da família *Poaceae*, sendo constituído de raízes seminais que se desenvolvem dos primórdios, presentes no embrião, e de raízes permanentes, nodais ou da coroa, que se desenvolvem de maneira progressiva, a partir de cada um dos 7 a 10 nós basais do colmo. A distribuição radicular de uma cultura é fundamental para o desenvolvimento de práticas racionais de manejo agrícola que visam a otimização da produtividade, (FANTE & REICHARDT, 1994). O conhecimento detalhado do sistema radicular e das influências dos parâmetros físicos, químicos e biológicos do solo no desenvolvimento das raízes é de grande importância.

A profundidade efetiva do sistema radicular é bastante difícil de ser definida, porém o critério mais adotado é que essa profundidade deve conter 95% ou mais do sistema radicular ativo da planta (REICHARDT & TIMM, 2004).

A concentração e a densidade de raízes estão intimamente relacionadas ao manejo da cultura e aos atributos físicos do solo. Bassoy et al. (1994), avaliando culturas de milho irrigado e não irrigado, observaram que tanto no tratamento irrigado como no de sequeiro a maior parte do sistema radicular concentrou-se até 0,40 m de profundidade.

Vários são os métodos para investigação do sistema radicular apresentados na literatura. Böhm (1979), descrevendo várias metodologias, cita o método do monólito e o uso da tábua com pregos como uma técnica adequada, sendo o tamanho dos monólitos dependentes da cultura e da disponibilidade de meios para manuseá-los. O método envolve a escavação de trincheiras, preparo das paredes, fixação da tábua com pregos na parede da trincheira e posterior remoção do bloco utilizando ferramentas como espátulas, facas e cavadores. É bastante trabalhoso, como a maioria dos métodos investigativos do sistema radicular e exige habilidade das pessoas envolvidas.

O milho, por ser uma planta C4 (Salisbury, 1994), apresenta características fisiológicas favoráveis na eficiência da conversão do dióxido de carbono da atmosfera em compostos orgânicos. Isso ocorre porque no processo fotossintético destas plantas, o CO₂ é continuamente concentrado nas células da bainha vascular das folhas (fonte), onde sob ação da enzima rubisco ocorre a produção de fotoassimilados, sendo estes redistribuídos para os locais onde serão estocados ou metabolizados (dreno). Esta relação fonte-dreno é alterada pelas condições do solo, clima, estágio fisiológico e nível de estresse da cultura. A principal diferença fisiológica entre as plantas que apresentam metabolismo C3 e C4 está relacionada ao processo de fotorrespiração. As plantas de metabolismo C3 perdem de 20% a 50% do carbono fixado, devido à fotorrespiração, enquanto as plantas com metabolismo C4, como é o caso do milho, não apresentam perdas significativas de CO₂ neste processo.

2.2 Fenologia

O milho é uma planta de ciclo vegetativo variado, evidenciando desde genótipos extremamente precoces, onde a polinização pode ocorrer 30 dias após a emergência (Fancelli & Dourado Neto, 2004), até mesmo aqueles cujo ciclo vital pode alcançar 300 dias. No Brasil, a cultura de milho apresenta ciclo variável entre 110 a 180 dias, em função da caracterização dos genótipos (superprecoce, precoce e tardio), período esse, compreendido entre a semeadura e a colheita. O ciclo da cultura compreende cinco etapas de desenvolvimento: (i) germinação e emergência: ocorre entre a semeadura e o aparecimento da plântula, cujo período varia entre 4 e 12 dias, em função da temperatura e umidade do solo; (ii) crescimento vegetativo: iniciado a partir da emissão da segunda folha, até o início do florescimento, cuja extensão varia em função do genótipo e de fatores climáticos, caracterizando e classificando diferentes genótipos quanto à duração do ciclo; (iii) florescimento: estabelecido entre o início da polinização e o início da frutificação; (iv) frutificação: período compreendido entre a fecundação e o

enchimento completo dos grãos, cuja duração varia entre 40 e 60 dias; (v) maturidade: período compreendido entre o final da frutificação e o aparecimento da “camada preta” no ponto de inserção dos grãos com a ráquis. A formação da “camada preta” representa o rompimento da ligação entre a planta-mãe e o fruto, caracterizando a maturidade fisiológica que é o momento ideal para a colheita, em função da máxima produção concentrada. No entanto, a alta umidade dos grãos nesse momento (30% a 38%), constitui-se num impedimento natural às operações mecânicas inerentes a um processo de colheita eficiente, o que se torna possível quando a umidade dos grãos encontra-se entre 18% e 25%, procedendo-se a secagem artificial até 13% de umidade, permitindo seu armazenamento seguro.

Durante a fase vegetativa, cada estágio é definido de acordo com a formação visível da lígula, na inserção da bainha da folha com o colmo. Assim, a primeira folha de cima para baixo com a lígula visível (saliência da folha das gramíneas na junção do limbo e da bainha), é considerada completamente desenvolvida e, portanto, é contada como tal (MAGALHÃES & DURÃES, 2006). Para os estádios posteriores à emissão da espiga, a identificação é efetuada com base no desenvolvimento e consistência dos grãos (KINIRY & BONHOMME, 1991). Os estudos da fenologia do milho foram definidos, inicialmente, por Hanway (1963) que estabeleceu onze estádios fenológicos, compreendendo o período da emergência até a maturidade fisiológica.

Fancelli (1986), citado por Fancelli & Dourado Neto (2004), adaptou esse trabalho, sugerindo a divisão do ciclo da cultura de milho em 11 estádios distintos, com o objetivo de correlacionar o desempenho agrônomo da planta com fatores genéticos e ambientais. O referido autor ressalta que, até o surgimento das espigas, os estádios devem ser identificados pelo número de folhas totalmente desdobradas. Visualmente pode detectar-se este evento quando a lígula torna-se totalmente visível. Após o aparecimento da espiga, os estádios passam a ser identificados através do desenvolvimento e da consistência dos grãos. Segundo estes autores, os estádios fenológicos são assim descritos: (i) estágio 0 (da semeadura à emergência); (ii) estágio 1 (planta com quatro folhas totalmente desdobradas); (iii) estágio 2 (planta com oito folhas); (iv) estágio 3 (plantas com doze folhas); (v) estágio 4 (emissão do pendão); (vi) estágio 5 (florescimento e polinização); (vii) estágio 6 (grãos leitosos); (viii) estágio 7 (grãos pastosos); (ix) estágio 8 (início da formação de “dentes” que é a concavidade na parte, superior do grão); (x) estágio 9 (grãos “duros”); e (xi) estágio 10 (grãos maduros fisiologicamente).

Para a definição dos estádios fenológicos, o desenvolvimento da planta é dividido em uma fase vegetativa (V) e uma fase reprodutiva (R). A subdivisão da fase vegetativa é feita a

partir da emergência (VE) e designada, numericamente de acordo com o número de cada folha totalmente aberta. A primeira folha totalmente aberta (V1) apresenta formato ovalado e é o ponto de referência para a contagem das folhas, de baixo para cima, caracterizando cada estágio fenológico da fase vegetativa, até a enésima folha totalmente aberta. A fase vegetativa termina com a emissão do pendão (VT) da planta. A fase reprodutiva tem início com o florescimento feminino (R1), compreendendo a visualização dos estilos-estigmas fora das brácteas. Os estágios posteriores são o de grão leitoso (R2), grão pastoso (R3), grão farináceo (R4), grão farináceo duro (R5) e maturidade fisiológica (R6) caracterizada pela formação da “camada preta” (RITCHIE *et al.*, 1993).

2.3 Importância econômica e social

O milho é um cereal com elevada importância social e econômica, liderando o volume de produção de grãos, no mundo. Em 2003, foram produzidas por volta de 638 milhões de toneladas, sendo movimentados no mercado internacional mais de 70 milhões de toneladas anuais. No período de 1990 a 2003, o Brasil apresentou um crescimento de 124% na quantidade produzida de milho e um aumento de apenas 14% na área colhida. Esses valores indicam que o aumento na quantidade produzida deveu-se principalmente à elevação da produtividade, que teve um acréscimo de 97% no mesmo período. Isto se deve, em grande parte, ao papel exercido pelas novas tecnologias desenvolvidas pela pesquisa agropecuária na área de melhoramento e manejo da cultura (CUENCA *et al.*, 2005).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial, sendo superado apenas pelos Estados Unidos e pela China. De acordo com dados da CONAB (2009), a área semeada no Brasil na safra 2008/2009 foi de 14,19 milhões de hectares, e produção aproximada de 51,91 milhões de toneladas, conferindo uma produtividade média nacional de 3,66 t ha⁻¹. O Nordeste participa com uma área cultivada de 3,09 milhões de hectares, e produção 4,81 milhões de toneladas deste total, conferindo uma produtividade de 1,56 t ha⁻¹. Os Estados maiores produtores são: Paraná (24,2%), Mato Grosso (13,0%), Minas Gerais (12,4%) e Rio Grande do Sul (8,8%). O estado de Alagoas participa com apenas 0,09% da produção nacional correspondendo a 45,0 mil toneladas, insuficientes para o abastecimento interno do próprio estado, estimado em 260 mil toneladas por ano (SEAGRI, 2009).

O milho apresenta elevada importância, tanto diretamente na alimentação humana como na alimentação animal, se constituindo em uma grande fonte de energia, principalmente, para a produção de aves e suínos. Devido a grande diversidade de aplicações,

a cultura de milho apresenta relevante importância social e econômica. Além da geração de empregos no setor primário, o milho é matéria-prima indispensável para impulsionar diversos complexos agroindustriais (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004).

No Estado de Alagoas, a cultura é praticada, geralmente em consórcio com o feijão e outras culturas de subsistência, por pequenos produtores que trabalham em regime de economia familiar, predominando os estratos de áreas menores que 50 ha. A área destinada ao cultivo do milho, em 2003, sofreu decréscimo na maior parte dos municípios. Os municípios de Girau do Ponciano e Taquarana passaram a ser os principais concentradores de área colhida com milho (13%), seguido de Palmeira dos Índios, Arapiraca e Igaci, com 9%, cada. As concentrações de área dos principais municípios produtores alagoanos, em 2003, estão expressas na Figura 1.

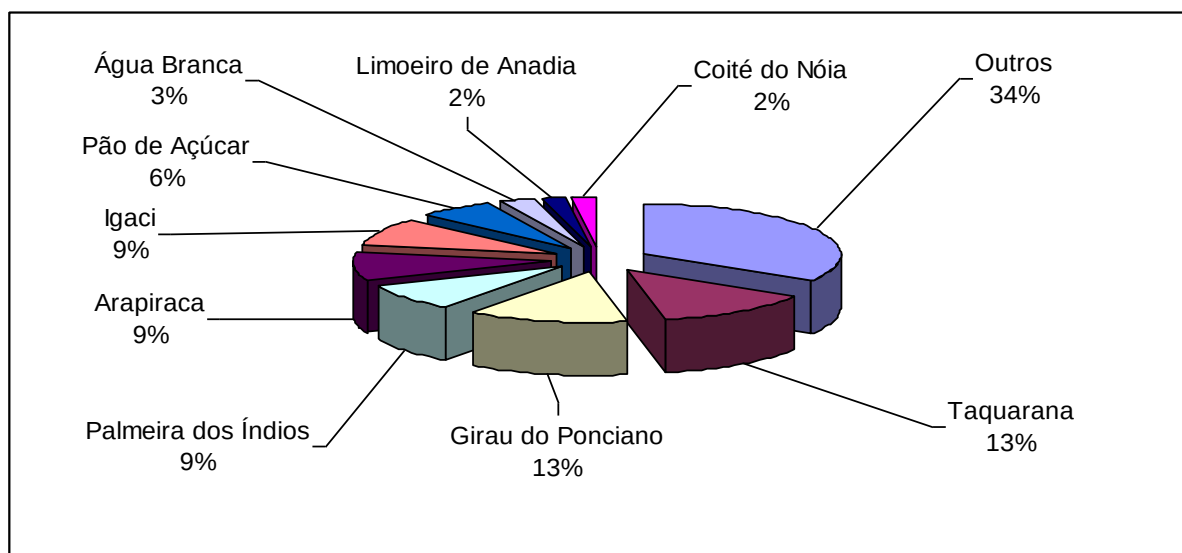


Figura 1. Participação percentual dos principais municípios alagoanos na área colhida com milho, em 2003 (CUENCA et al. 2005).

Segundo Cuenca et al. (2005), no período de 1996 a 2003, o Estado de Alagoas apresentou aumento na produção de 13%, tendo como destaque o município de Limoeiro de Anadia, com evolução de 275%, Taquarana (160%), Coruripe (150%), Olho d'Água das Flores (143%), São Miguel dos Milagres (133%), Palmeira dos Índios (127%), Lagoa da Canoa (125%) e Satuba (100%). Este incremento na produção, possivelmente, esteve relacionado ao aumento das áreas cultivadas com milho isolado e com maiores investimentos em insumos como sementes híbridas e fertilizantes. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA – conduz, anualmente, na região de Arapiraca, pesquisas de

avaliação e seleção de novos genótipos de milho com características produtivas mais adaptadas à região.

2.4 Elementos do clima e produtividade

A temperatura é determinante da duração dos estádios fenológicos do milho e, por consequência, do seu ciclo. A cultura se desenvolve em climas que variam desde a zona temperada até à tropical, durante os períodos em que as temperaturas médias são superiores a 15 °C e não ocorrem geadas. Quando as temperaturas médias, durante o período de crescimento, são superiores a 20 °C, o ciclo das variedades precoces varia de 80 a 110 dias, e o das variedades médias, de 110 a 140 dias, da sementeira até a fase de maturidade fisiológica (R6). Quando as temperaturas médias são inferiores a 20 °C, o ciclo da cultura aumenta de 10 a 20 dias para cada 0,5 °C de diminuição da temperatura, dependendo da variedade, devendo--se ressaltar que a 15 °C o ciclo da cultura do milho em grão varia de 200 a 300 dias (FREITAS *et al.*, 2004).

Regiões com temperaturas médias diárias inferiores a 19 °C e noites com temperaturas inferiores a 12,8 °C não são apropriadas para o plantio do milho. Dados experimentais relatam que a cada grau de temperatura média diária superior a 21,1 °C, nos primeiros 60 dias após a sementeira, pode apressar o florescimento de dois a três dias. Por ocasião da sementeira a temperatura do solo deverá ser superior a 10 °C e durante o crescimento deverá girar em torno de 25 °C e que temperaturas acima de 32 °C reduzem, sensivelmente, a germinação do grão de pólen, por ocasião de sua liberação. A elevação da temperatura contribui para a redução da taxa fotossintética líquida, em função do aumento da respiração. Sob condições de baixa latitude e altitude associadas à proximidade do mar, a temperatura noturna não apresenta variações importantes, permanecendo em patamares elevados durante, praticamente, toda a estação de crescimento. O aumento da temperatura noturna, contribui para o aumento da soma térmica, contribuindo para a redução do ciclo da cultura, reduzindo o tempo de exposição do aparato fotossintético da planta à radiação e, conseqüentemente, a quantidade de radiação interceptada, bem como expressão do potencial de produção. Temperaturas noturnas superiores a 24 °C incrementam a respiração, proporcionando um menor saldo de fotoassimilados, com conseqüente queda no rendimento da cultura. A produção pode ser reduzida, como também a composição protéica dos grãos pode ser alterada, quando ocorrem temperaturas acima de 35 °C a 37 °C por mais de 3 horas, por ocasião do período de formação do grão (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004).

A temperatura média mínima diária na germinação é de, aproximadamente, 10 °C sendo a faixa ótima entre 18 °C e 20 °C. A cultura é muito sensível à geada, principalmente no estágio de plântula, porém tolera condições atmosféricas quentes e secas, desde que a disponibilidade de água no solo atenda as exigências da planta e as temperaturas, nesse período, sejam inferiores a 45 °C (DOORENBOS & KASSAM, 1994).

A eficiência máxima de conversão da radiação solar é afetada pela temperatura diurna e noturna reinante no período, bem como pela amplitude térmica resultante. Assim, temperaturas diurnas relativamente elevadas, entre 28 °C e 32 °C, possibilitam altas taxas fotossintéticas, ao passo que temperaturas noturnas amenas, entre 18 °C e 20 °C, contribuem para o prolongamento do período de crescimento, assegurando à cultura maior número de dias para o aproveitamento efetivo da radiação incidente (DURÃES, 2007).

A temperatura do ar apresentou efeito tanto linear como quadrático sobre a duração do sub-período da semeadura à floração, no intervalo de valores de temperaturas médias entre 19,1 °C e 25,0 °C. A duração desse subperíodo apresentou-se altamente correlacionada com a temperatura média correspondente, indicando que esta é a variável que melhor explica tal duração (LOZADA & ANGELOCCI, 1999a). O rendimento do milho foi incrementado, em condições de baixa temperatura (Muchow *et al.*, 1990), devido ao aumento na duração do subperíodo, o que permite um tempo maior de interceptação da radiação solar pelo cultivo, sendo que o acúmulo de biomassa é diretamente proporcional à quantidade de radiação absorvida e o rendimento em grãos diretamente proporcional ao acúmulo de biomassa.

Todos os processos fisiológicos e funções da planta ocorrem dentro de limites térmicos no ambiente em que elas se desenvolvem. Para completarem cada subperíodo do desenvolvimento as plantas necessitam entre outros fatores, de um somatório térmico. Um dos índices mais utilizados para expressar esse requerimento é o denominado graus-dia, que se baseia no acúmulo térmico, dentro dos limites nos quais a planta se desenvolve, definidos pelas temperaturas basais inferior e superior. Considerando-se que a temperatura-base superior geralmente é elevada e que esta raramente é atingida nas condições climáticas onde as culturas se desenvolvem, normalmente, para efeito de cálculos, não se considera o limite superior e utiliza-se somente a temperatura-base inferior. No caso do milho tem-se considerado a temperatura base igual a 10 °C e o subperíodo da semeadura à floração do milho híbrido estudado, apresenta alta correlação com a temperatura do ar (LOZADA & ANGELOCCI, 1999b).

Os vegetais, através da fotossíntese, produzem diariamente milhões de toneladas de materiais orgânicos que, são acumulados nas estruturas de reserva ou metabolizados nos

processos respiratórios. O milho praticamente não apresenta saturação por radiação solar, pelo fato de ser uma planta C4. O mecanismo de concentração de CO₂ através da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase, provoca uma saturação deste composto no sítio da enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase oxigenase (Rubisco), não permitindo a limitação da carboxilação (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Em última instância pode-se afirmar que a principal fonte de energia a regular os processos biológicos, na natureza, é a radiação solar. Denomina-se radiação ou energia radiante, a energia que se propaga sem necessidade da presença de um meio material. O termo radiação é igualmente aplicado para designar o próprio processo de transferência desse tipo de energia (VAREJÃO, 2006).

O cálculo da energia livre, entrando em um sistema planta-ambiente, é necessário para se estimar o potencial produtivo de culturas ou comunidades de plantas. A fotossíntese é o processo básico de transformação de energia nesse complexo sistema, e os modelos correntes de utilização de radiação pelas plantas são quase sempre baseados na radiação fotossinteticamente ativa, RFA, ao invés da radiação solar total. A amplitude da RFA é determinada de acordo com a banda do espectro de absorção dos pigmentos das plantas. Os comprimentos de onda da radiação entre 400 nm e 700 nm, são normalmente considerados como a faixa da RFA (TAIZ & ZEIGER, 2004).

A eficiência do uso da radiação pela cultura (EUR g MJ⁻¹) é uma variável derivada da relação da massa seca acumulada pela cultura e da radiação interceptada ou absorvida pelo dossel vegetal, num intervalo de tempo. A EUR é uma medida independente, que pode ser usada para descrever o desempenho das culturas e destacar limitações na produtividade. A EUR está relacionada, quase que linearmente, com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida, RFA_{abs} (MONTEITH, 1977). Para efeito de cálculo, a RFA representa 40% a 50% do total da radiação solar direta coletada pelos solarímetros, ou seja, é a radiação possível de ser interceptada pelas folhas. Essa estimativa já inclui a presença da radiação difusa. O valor da EUR para a cultura do milho varia entre de 3,0 a 4,2 g MJ⁻¹ de massa seca (KINIRY *et al.* 1989; CIRILO & ANDRADE, 1994).

A eficiência no uso da água, EUA, (g m⁻² mm⁻¹) é uma grandeza definida pela razão entre a massa seca total e quantidade de água consumida pela planta para produzi-la. Geralmente, adotam-se valores médios do conteúdo energético para toda a massa seca ou para parte desta. Em virtude do conteúdo energético de cada parte da planta ou de toda a parte aérea variar de parte para parte e de espécie para espécie, podem verificar-se erros, superestimando ou subestimando a eficiência de aproveitamento da água ou da radiação. Isso

dependerá do conteúdo energético da biomassa e da fase de desenvolvimento da planta (VIEIRA *et al.*, 1990). A eficiência no uso da água (EUA) pode ser definida como a razão entre o rendimento da cultura, geralmente o rendimento econômico, e a quantidade de água utilizada para produzir este rendimento (ZHANG *et al.*, 2004). A eficiência do uso da água também pode ser obtida, pela inclinação da reta da regressão linear que relaciona a massa seca (variável dependente) com a quantidade de água necessária para produzi-la (STEDUTO & ALBRIZIO, 2005; GRASSINI *et al.*, 2009).

2.5 Balanço hídrico do solo.

A produtividade das culturas, associada às condições climáticas e edáficas, depende da disponibilidade de água e nutrientes no solo, em épocas e quantidades apropriadas. O excesso e, principalmente, a falta de água representa em muitas regiões importante fator de depleção da produtividade ou, até mesmo, a perda total da produção. O conhecimento de como a água se comporta no solo e no contínuo solo-planta-atmosfera tem sido objeto de muitos estudos, nas últimas décadas.

O entendimento detalhado da dinâmica da água, durante o desenvolvimento das culturas, fornece subsídios essenciais ao manejo adequado e sustentável das explorações agrícolas. O comportamento da água no solo está diretamente relacionado à produção vegetal e o seu conhecimento é de interesse fundamental para qualquer tomada de decisão sobre a exploração agrícola dos solos, (LIMA *et al.*, 2006). De acordo com Cruz *et al.* (2005), o consumo de água pelas comunidades vegetais é uma variável importante a ser considerada nos estudos de reorganização agrícola ou na avaliação da produtividade das culturas. Uma forma pela qual o consumo de água pode ser determinado é pelo balanço hídrico da água no solo.

Define-se balanço hídrico no solo vegetado, como a contabilização das entradas e saídas de água no solo, em um dado período de tempo. A importância do balanço hídrico, como ferramenta para avaliar a intensidade das saídas e entradas de água no solo e, por conseguinte, na definição dos períodos mais prováveis de déficit hídrico para a cultura, está relacionada, não só ao conhecimento dos fatores que o compõem (evapotranspiração, precipitação, drenagem interna ou ascensão capilar e escoamento superficial), como também ao conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço (CINTRA *et al.*, 2000).

Uma forma de calcular o armazenamento acumulado de água no solo é a utilização da regra do trapézio, considerando-se que as medidas realizadas em intervalos igualmente espaçados, desde a superfície do solo até a profundidade de interesse. A variação no armazenamento de água no perfil de solo é determinada pela diferença dos valores do conteúdo de água do solo obtidos do perfil, nos tempos iniciais e finais de cada período considerado (LIBARDI, 2005).

Rana & Katerji (2000), avaliando o assunto em ampla revisão, afirmam que o balanço hídrico de água no solo é uma maneira de determinar indiretamente a evapotranspiração, obtida como termo residual da equação, baseada no princípio da conservação das massas. Entretanto, como é difícil realizar com precisão todas as medidas, o número de simplificações feitas nesse método faz com que as medidas da evapotranspiração (ET) sejam insatisfatórias. A precipitação pluvial pode ser mensurada e o suprimento de água pela irrigação, em princípio é conhecido, porém todos os outros termos precisam ser medidos ou, pelo menos, estimados. As simplificações introduzidas podem ser críticas, pois mesmo em climas semi-áridos, o escoamento superficial depende da ocorrência e características das precipitações (volume intensidade e duração) podendo ser desprezível, apenas, para solos arenosos e franco-arenosos.

A drenagem e ascensão capilar são os termos do balanço hídrico, mais difíceis de serem calculados e vários autores sugerem negligenciá-los para regiões secas. Entretanto tem sido demonstrado que isso não é fácil de ser admitido, pois o fluxo profundo de água é uma fração importante do balanço hídrico em ambas as estações, seca e úmida, em diferentes escalas de tempo e de espaço. Em geral, para estimativas diárias, a drenagem pode ser negligenciada se o suprimento hídrico (irrigação e/ou chuvas) não exceder a capacidade de armazenamento de água do solo.

Diante da complexidade de mensurar, com precisão, a componente drenagem, Klaij & Vachaud (1992), propuseram dois modelos para o cálculo do balanço hídrico, em solos arenosos, em condições de campo na Nigéria. O primeiro considera que existe um período, normalmente antes das primeiras chuvas, em que a umidade na profundidade medida abaixo da profundidade máxima do sistema radicular permanece suficientemente baixa e a condutividade hidráulica, nesse caso pode ser desprezada. Portanto, o fluxo de água é desprezível e a evapotranspiração e a drenagem podem ser calculadas com base na mudança do armazenamento de água no perfil do solo entre as medidas efetuadas nos intervalos de tempo.

A drenagem é calculada através da mudança no armazenamento de água entre a profundidade radicular e um plano abaixo dessa profundidade. A aplicação desse modelo é válida em períodos de baixa precipitação e alta evapotranspiração.

O segundo modelo é aplicável quando as chuvas têm recarregado totalmente o perfil do solo e a água começa a percolar. Então, a percolação de água através do plano abaixo da profundidade radicular deixa de ser desprezível e a evapotranspiração entre o tempo t e $t + \Delta t$ requer a estimativa do conteúdo de água drenado abaixo da zona radicular.

O balanço hídrico, por esse método, é mais complexo, uma vez que, exige conhecimentos sobre a condutividade hidráulica do solo e do gradiente hidráulico.

O conhecimento do conteúdo de água no solo é imprescindível, para qualquer estudo que envolva relações solo-planta-atmosfera.

Existem vários métodos de determinação da água no solo, podendo ser classificados em métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos consistem na aplicação de técnicas que mensuram diretamente o conteúdo de água de uma amostra, basicamente por secagem, permitindo estabelecer uma relação entre o quantitativo de água e o solo em base de massa ou de volume. Os métodos indiretos se baseiam na medida de propriedades físicas ou físico-químicas do solo que possibilitem o estabelecimento de correlações com o conteúdo de água no solo. Os métodos diretos exigem a coleta de amostras e, portanto, perturbações do ambiente no qual as plantas se desenvolvem, tornando-se laboriosos, principalmente quando se desejam amostragens contínuas e com alta frequência. Já os métodos indiretos apresentam a vantagem de serem não destrutivos e proporcionam menor tempo e trabalho na execução das medidas, porém exigem calibrações, dependendo dos atributos do meio (TOMMASELLI, 1997).

Reichardt & Timm (2004), descreveram os principais métodos de determinação da umidade do solo, ao tempo em que fizeram referências às suas vantagens, desvantagens e aplicações. O método gravimétrico é o mais tradicional e conhecido e consiste na coleta de amostras de solo, determinação da sua massa úmida e da sua massa seca submetendo-a a secagem em estufa a 105 °C por 48 horas, ou até a estabilização das pesagens. Para a determinação da umidade em base de massa, a amostra pode ser deformada e coletada com trados. Para a determinação da umidade volumétrica, devem-se coletar amostras indeformadas, com anéis volumétricos, ou calculá-la a partir da umidade em base de massa e da densidade do solo.

O uso da tecnologia da reflectometria no domínio do tempo (TDR) tornou possível fazer estimativas do conteúdo de água no solo em tempo real e em pequenos intervalos de

tempo, sem a necessidade de desenvolver processos laboriosos e invasivos do solo. Esse método tem sido mais utilizado na pesquisa devido a sua precisão, facilidade de acoplamento a um sistema de coleta de dados, rapidez e segurança ao operador (SILVA *et al.*, 2007). Essa técnica tem se mostrado muito promissora, atualmente, pois além de apresentar medidas precisas dos valores do conteúdo de água, em uma larga faixa de materiais porosos, necessita de pequenas calibrações para solos específicos. Como outros métodos de medidas indiretas, a TDR avalia o conteúdo médio do meio em volta das sondas de prova (FERRÉ *et al.*, 2002). A determinação do conteúdo de água do solo é obtida a partir da estimativa da constante dielétrica calculada, usando-se a técnica da reflectometria no domínio do tempo. Este valor é baseado no tempo de emissão/reflexão de um pulso eletromagnético, emitido por um gerador de pulsos, em hastes metálicas paralelas ou não, que servem como guia de ondas. A constante dielétrica determinada será a do material entre as hastes metálicas, que no caso é o solo. A configuração da sonda, com suas hastes, assemelha-se à construção de um capacitor em que o material dielétrico é o próprio solo (PEREIRA *et al.*, 2006).

A partir do trabalho desenvolvido por Topp *et al.* (1980), a técnica passou a ser utilizada para a determinação do conteúdo de água do solo, sendo considerada como muito promissora. O princípio básico que a fundamenta é medir o tempo de deslocamento em nanosegundos de uma sequência de pulsos, na frequência de microondas, em uma linha de transmissão (antena) composta de duas hastes de aço que são introduzidas no solo. Como o solo tem constante dielétrica entre 3 e 5, o ar 1 e a água 81, quanto maior o conteúdo de água do solo maior será a constante dielétrica aparente e maior será o tempo de deslocamento do pulso aplicado. De acordo com Coelho & Souza (2007), a constante dielétrica aparente do solo é uma resultante das constantes dielétricas dos meios presentes no solo, isto é, do meio poroso (ar) da matriz do solo, do meio líquido (água), e meio sólido (partículas do solo). Diante da grande variação entre os valores da constante dielétrica da água e dos demais componentes do solo, fica caracterizado que o maior efeito no retardamento da onda é decorrente do aumento do conteúdo de água no solo, tornando-se possível pela técnica, a sua mensuração (TOMMASELLI & BACCHI, 2001).

A técnica da TDR reúne algumas vantagens importantes como, a característica não destrutiva, a rapidez na obtenção dos resultados e a garantia de segurança do operador no seu manuseio. O método ainda é caro em função do preço elevado do emissor de pulsos, mas as perspectivas apontam para sistemas bem mais baratos nos próximos anos. Uma das características mais atrativas da técnica do TDR é a sua habilidade de monitorar contínua e simultaneamente o conteúdo de água do solo em vários locais (TOMMASELLI, 1997).

As fábricas dos equipamentos de TDR disponibilizam modelos matemáticos que permitem o cálculo da constante dielétrica aparente do meio, pela qual se calcula o conteúdo de água do solo, sendo esses modelos de caráter empírico, não levando em conta os efeitos das propriedades físicas do solo, razão pela qual podem não ser os mais adequados. Há que considerar-se que a calibração desses equipamentos considera a conexão direta das guias aos testadores de cabo, não levando em consideração os multiplicadores de canais de conexão de cada haste de TDR, conhecidos como multiplexadores. O uso de tais equipamentos pode causar perdas no sinal e com isso, afetar os valores da constante dielétrica do solo, principalmente, quando se usam guias de onda não industriais. O uso de multiplexadores tem sido difundido na literatura especializada sem mencionar a necessidade de calibração (COELHO *et al.*, 2006).

2.6 Evapotranspiração.

A água é uma substância, que apresenta propriedades peculiares e únicas, existente na natureza sob as formas sólida, líquida e gasosa. A mudança da fase sólida para a fase líquida requer $0,34 \text{ MJ kg}^{-1}$ enquanto que, para a passagem do estado líquido para o estado de vapor, a água requer $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ a 20°C , sendo esta energia conhecida como calor latente de vaporização. O crescimento das plantas está diretamente relacionado à disponibilidade de água, porém apenas 1% da água absorvida pelos vegetais, está relacionada aos seus processos metabólicos, sendo que este percentual de água funciona como matéria prima no processo de fixação do CO_2 para produção de carboidratos, através da fotossíntese. O restante passa pelas estruturas da planta e é perdida para a atmosfera, sob a forma de vapor. A evaporação é definida como o processo físico pelo qual um líquido passa para o estado gasoso. A maior parte da água evaporada pelas plantas é proveniente da absorção pelas raízes passando pelo tecido vascular, chegando até as folhas, passando para atmosfera, principalmente através dos estômatos, podendo ser liberada também pela cutícula, processo conhecido como transpiração (T). A evaporação direta do solo (E), e a transpiração, ocorrem simultaneamente na natureza. Assim, o processo total de transferência de água, de superfícies vegetadas, para atmosfera é chamado de evapotranspiração, ET (ROSEMBERG *et al.*, 1983).

A evapotranspiração é regida pela disponibilidade de energia no ambiente, pela disponibilidade de água no solo e pela demanda atmosférica. A disponibilidade de energia depende da localização geográfica da área, com ênfase para a latitude e a topografia. A latitude determina a radiação solar total diária possível de ser utilizada no processo da

evapotranspiração (PEREIRA *et al.*, 1997). Considerando uma área plana, a quantidade de energia solar diária é dependente da estação do ano, a qual determina o ângulo de inclinação dos raios solares. Em locais cuja topografia é acidentada, dependendo das estações do ano, faces distintas receberão quantidades de radiação diferentes. A demanda atmosférica é governada pelo poder evaporante do ar (quanto menor a umidade, maior será a demanda atmosférica) que depende do déficit de pressão de vapor e da velocidade do vento.

O Boletim FAO 56 (Allen *et al.*, 1998) apresenta os conceitos mais usados atualmente, fazendo as distinções entre evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura sob condições padrão (ET_c) e evapotranspiração da cultura sob condições não padrão, considerada ET_c ajustada (ET_{c_{ajust}}) ou ET real (ET_r). Alguns detalhes que constam do Boletim FAO 56 são descritos nos parágrafos a seguir.

A evapotranspiração é afetada pelas características da cultura, manejo, fatores ambientais e variáveis meteorológicas. Dentre os principais elementos meteorológicos, pode-se citar a radiação, a temperatura e a umidade do ar e a velocidade do vento. Os principais fatores relacionados à cultura são o tipo, a variedade e a fase de desenvolvimento. Os elementos da cultura como rugosidade, a altura do dossel, a reflexão, a cobertura do solo e a profundidade do sistema radicular determinam diferentes valores de evapotranspiração para culturas distintas, sob as mesmas condições ambientais. As práticas de manejo da cultura e as condições ambientais como salinidade do solo, fertilidade, presença de horizontes compactados no solo, pragas e doenças podem conferir desenvolvimentos distintos a cultura, alterando os valores da transpiração.

A evapotranspiração de uma superfície de referência, sem falta de água, é chamada de evapotranspiração da cultura de referência ou evapotranspiração de referência (ET_o). O conceito da evapotranspiração de referência foi introduzido para estudar o poder evaporativo da atmosfera independentemente do tipo de cultura, desenvolvimento da mesma e práticas de manejo. A superfície de referência é uma grama hipotética apresentando uma altura de 0,12 m, uma resistência de superfície fixa de 70 s m⁻¹ e um albedo de 0,23, assemelhando-se a uma superfície extensa de grama verde, sem restrições de água e altura uniforme, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo. A ET_o pode ser calculada a partir de dados meteorológicos. Como resultado de uma Consulta de Especialistas realizada em maio de 1990, o método da FAO Penman-Monteith foi recomendado como o método padrão, para a definição e estimativa da ET_o. A evapotranspiração da cultura (ET_c) é definida para plantas cultivadas livres de doenças, pragas e desenvolvidas em áreas extensas sob condições de umidade e fertilidade do solo ótimas, obtendo a máxima produção sob condições

meteorológicas específicas. Os efeitos das condições meteorológicas para cada localidade são incorporadas na ET_o , enquanto o coeficiente de cultura único (K_c), incorpora os efeitos da evaporação da superfície do solo, da transpiração e as diferenças entre a própria cultura e a cultura de referência. Em virtude das flutuações da umidade na superfície do solo, o coeficiente de cultura único é mais adequado para períodos semanais ou intervalos mais longos, embora possa ser utilizado para períodos diários.

Para a determinação da ET_c , sob condições ambientais que fogem ao padrão, há necessidade de se fazer um ajuste uma vez que, quando a umidade do solo vai diminuindo, as forças de retenção e coesão, que agem no solo, dificultam a absorção da água pelas raízes. Em solos secos, a água tem uma baixa energia potencial, estando fortemente retida nos capilares do solo, sendo assim, absorvida em menor quantidade pela cultura. No uso do coeficiente de cultura duplo, os efeitos da transpiração da cultura e da evaporação do solo são determinados separadamente. O valor do coeficiente de cultura basal (K_{cb}), incorpora, apenas, a transpiração da planta, com a camada superficial do solo seca, porém apresentando um conteúdo de água na zona radicular suficiente para manter a transpiração plena. É definido como a relação entre ET_c e ET_o e pelo fato de incorporar apenas a transpiração, esses valores de K_{cb} são baixos, principalmente na fase inicial de cultivo. A evaporação da superfície do solo é descrita pelo coeficiente de evaporação (K_e), e é maior na condição de maior umidade na superfície do solo, decrescendo à medida que o solo seca, podendo chegar a zero.

2.7 O déficit hídrico

No Nordeste semi-árido brasileiro a inconstância e, em alguns locais, a insuficiência pluvial é o fator mais determinante da produção de milho, em regime de sequeiro. Mesmo na região conhecida por “Tabuleiros costeiros”, com período chuvoso relativamente satisfatório, a ocorrência de “veranicos” se constitui em um fator de risco para a exploração da cultura do milho. Estes períodos de estiagem podem reduzir o conteúdo de água no solo e comprometer a produção e produtividade do cereal.

O déficit hídrico é definido como todo o conteúdo de água em um tecido ou célula, que está abaixo do conteúdo de água exibido no estado de maior hidratação. As plantas em seus ambientes naturais, raramente crescem sob plena hidratação, sofrendo déficits hídricos que levam a inibição do crescimento celular. O estresse hídrico mais severo conduz a inibição da divisão celular, ao fechamento dos estômatos com redução da fotossíntese, a redução da síntese de proteínas e do acúmulo de solutos. Como os estômatos fecham durante os estádios

iniciais do estresse hídrico, a eficiência no uso da água (EUA) pode aumentar uma vez que pode ocorrer uma maior absorção de CO₂ por unidade de água transpirada (TAIZ & ZEIGER, 2004). A redução no metabolismo de proteínas causa interrupção na divisão celular e mesmo um estresse moderado diminui a velocidade do processo mitótico. Se a deficiência hídrica ocorre durante o desenvolvimento do pólen, a meiose apresenta anomalias cromossômicas e distúrbios, notadamente na metáfase e anáfase, induzindo a diminuição da fertilidade do pólen. O estresse hídrico desencadeia a síntese de ácido abscísico (ABA) a partir de carotenóides da raiz e esse ácido é transportado como um sinal da raiz para diversas partes da planta. Nas folhas o ABA induz o fechamento estomático reduzindo as trocas gasosas. À medida que a desidratação da folha aumenta, os processos catabólicos aumentam, a senescência é acelerada e as folhas mais velhas sofrem dessecação e posterior abscisão (LARCHER, 2006).

O milho apresenta maiores exigências hídricas nas fases de emergência, florescimento e formação dos grãos. O período mais crítico da cultura encontra-se compreendido entre 15 dias antes e 15 dias após o florescimento masculino (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004). Mesmo sendo uma planta C₄, o milho apresenta alta sensibilidade aos déficits hídricos, principalmente quando estes ocorrem nos períodos críticos da cultura. Independentemente da condição climática regional, a produtividade de grãos de milho é decorrente das condições hídricas durante o período crítico. Portanto, o rendimento do milho pode ser comprometido mesmo em anos climaticamente favoráveis, se o déficit hídrico ocorrer no período crítico, ou seja, da pré-floração ao início de enchimento de grãos. Durante o período vegetativo, o déficit hídrico reduz o crescimento do milho, em função de decréscimos da área foliar e da biomassa. Porém, nesse período não estão sendo formados os componentes do rendimento. Assim, os efeitos sobre a produção de grãos são atenuados posteriormente, se as condições hídricas se tornarem favoráveis, o que poderá garantir níveis satisfatórios de rendimento de grãos (BERGAMASCHI *et al.* 2004). Portanto, se o déficit hídrico ocorrer no período crítico (Morizet & Togola, 1984), a recuperação da capacidade produtiva da cultura não poderá ocorrer de forma satisfatória, uma vez que os eventos reprodutivos são muito mais rápidos do que os verificados durante o crescimento vegetativo. Nessa fase fenológica, o milho é extremamente sensível ao déficit hídrico, em decorrência dos processos fisiológicos ligados à formação do zigoto e início do enchimento de grãos (Shussler & Westgate, 1991; Zinselmeier *et al.*, 1995), além da elevada transpiração, decorrente da máxima área foliar e da elevada carga energética proveniente da radiação solar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Características da Área Experimental

O experimento de campo foi instalado e conduzido em uma área agrícola, situada às margens da Rodovia AL 115, no povoado Batingas, no município de Arapiraca/AL, com latitude de 09°48'55,1" S, longitude de 36°36'22,8" W e altitude de 236 m, no período de maio a outubro de 2008. A topografia é plana e o solo classificado como latossolo vermelho amarelo distrófico, (EMBRAPA, 1999). A área era cultivada anteriormente com o consórcio fumo mandioca, conduzido durante a estação chuvosa.

O município de Arapiraca situa-se na região do agreste sub-úmido de Alagoas (Lima, 1965) onde o clima é do tipo As', segundo a classificação climática de Köppen, com uma estação seca no verão e chuvas de outono/inverno. De acordo com Nimer (1977), o município é caracterizado por apresentar temperaturas elevadas, com a média anual de 25 °C, e totais anuais de precipitação pluvial entre 750 a 1000 mm. Os meses mais chuvosos são maio, junho e julho nos quais, geralmente, se concentram mais de 50% do total anual das chuvas e os menores registros de precipitações pluviais ocorrem na primavera e no verão.

Para a determinação da análise granulométrica e classe textural do solo (Tabela 1), foi aberta uma trincheira e coletadas amostras a cada 0,10 m de profundidade e encaminhadas ao

Tabela 1. Granulometria⁽¹⁾ (areia, silte e argila) e classe textural nas profundidades de 0 a 120 cm.

Profundidades (cm)	Areia (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	Classe Textural
00 - 10	870	110	20	Areia- franca
10 - 20	870	110	20	Areia- franca
20 - 30	830	150	20	Franco-arenosa
30 - 40	830	150	20	Franco-arenosa
40 - 50	770	220	10	Franco-argiloarenosa
50 - 60	750	240	10	Franco-argiloarenosa
60 - 70	680	310	10	Franco-argiloarenosa
70 - 80	650	330	20	Franco-argiloarenosa
80 - 90	650	330	20	Franco-argiloarenosa
90 - 100	640	310	50	Franco-argiloarenosa
100 - 110	650	310	40	Franco-argiloarenosa
110 - 120	660	310	30	Franco-argiloarenosa

⁽¹⁾ Laboratório de Solo, Água e Energia-Centro de Ciências Agrárias-CECA/UFAL.

laboratório de física dos solos, do Centro de Ciências Agrárias CECA/UFAL, para análise granulométrica e classificação textural, conforme metodologia estabelecida pela EMBRAPA (1997)

3.2 Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi composto por quatro épocas de semeadura, sendo três compreendidas dentro do período recomendado pelo zoneamento climático do Ministério da Agricultura para a cultura do milho, em Alagoas e um tardio, em que a semeadura ocorreu dez dias após a data limite preconizada pelo zoneamento. A primeira época de semeadura (T1) ocorreu no dia 06 de maio, a segunda (T2) no dia 19 de maio, a terceira (T3) no dia 10 de junho e quarta (T4) no dia 30 de junho de 2008.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com seis repetições, em que as quatro épocas de semeadura se constituíram nos tratamentos. As dimensões da parcela foram de 10 x 9,6 m, compreendendo uma área de 96 m². O espaçamento entre linhas foi de 0,80 m, sendo cada parcela composta por 12 linhas de 10 m de comprimento e a população final de 55 000 plantas ha⁻¹. Em virtude da concorrência estabelecida entre os tratamentos, em função das épocas de plantio, foram deixadas quatro linhas de bordadura para cada parcela.

Os dados foram analisados aplicando-se a ANOVA, teste-F e o teste de Tukey de comparação de médias, por meio de programas estatísticos computacionais (SISVAR e ORIGIN 6.0).

3.3 Implantação e condução do experimento de campo

O experimento foi implantado com a variedade de milho Al Bandeirantes, desenvolvida pelo Departamento de Sementes, Mudas e Matrizes da CATI, apresentando ciclo semiprecoce, altura média das plantas de 2,30 m, tipo semiduro, boa resistência ao acamamento, coloração do grão alaranjada, florescimento entre 62 a 63 dias e produtividade em torno de 7 t ha⁻¹. Em virtude de ser variedade, o preço da semente é compatível com realidade sócio-econômica da região, além de permitir que o próprio agricultor produza a sua semente. Avaliações feitas em vários estados do Nordeste recomendam essa variedade para a região (CARVALHO *et al.*, 2006).

Dois meses antes da semeadura, o solo foi corrigido aplicando-se 1 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, visando elevar a saturação por bases para 70%. O produto foi espalhado manualmente e posteriormente incorporado através de gradagem, na profundidade de 0,2 m. Uma semana antes do plantio a área foi novamente gradeada utilizando-se a grade niveladora, uniformizando a superfície do solo e eliminando algumas plantas invasoras.

Para a semeadura, em todas as épocas, foram abertos sulcos manualmente com auxílio de enxadinha de jardinagem a uma profundidade de 10 cm. Posteriormente, foram abertas covas lateralmente ao sulco utilizando um marcador de covas desenvolvido para tal fim, obedecendo a profundidade 4 a 6 cm, de forma a permitir, em todas as linhas, o quantitativo de 44 covas para cada 10 m de linha, perfazendo 55 000 covas ha⁻¹. Para assegurar a população de plantas desejada, foram semeadas 4 a 5 sementes por cova que foram posteriormente cobertas manualmente. Quando as plantas apresentavam três folhas, foi feito o desbaste deixando uma planta, mais representativa, por cova.

Antes da semeadura, as sementes foram tratadas com uma mistura de carbofuran (310 g L⁻¹) mais zinco (210g L⁻¹) na dose de 2,25 L para cada 100 kg de sementes. Esse procedimento objetivou controlar as pragas iniciais da cultura, principalmente as de solo, além de oferecer as plantas um suprimento inicial de zinco. A adubação de fundação foi efetuada conforme recomendação de Cruz *et al.* (1996), utilizando 40 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 50 kg ha⁻¹ de K₂O mais 2 kg ha⁻¹ de Zn, aplicados no fundo do sulco ao lado e abaixo das covas de plantio.

A adubação de cobertura foi efetuada utilizando 100 kg ha⁻¹ de N, divididos em duas aplicações, quando as plantas apresentavam 4 e 8 folhas totalmente expandidas. A fonte de N utilizada foi o sulfato de amônio, visando reduzir as perdas de N por volatilização e oferecer um suprimento adicional de enxofre à cultura. Foram feitas três aplicações de uma solução de micronutrientes, quando as plantas apresentavam quatro, seis e oito folhas totalmente expandidas.

Para manter a cultura livre de plantas invasoras durante todo ciclo de cultivo, foi utilizado o herbicida preemergente de translocação Boxer[®] (Alachlor 300 g L⁻¹ mais Atrazina 180 g L⁻¹), aplicando-se 7 L ha⁻¹ com pulverizador costal com vazão de 240 L ha⁻¹. Foi realizada uma capina manual complementar, quando surgiram algumas plantas invasoras ao longo do ciclo da cultura.

Para o controle da lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*), foram feitas pulverizações alternando os inseticidas comerciais Lorsban[®] (Clorpirifós 480 g L⁻¹) e Lannate

BR[®] (Methomyl 215 g L⁻¹). As aplicações foram feitas com pulverizador costal, sempre que se identificava a presença da praga através de folhas raspadas.



Figura 2. Vista geral do experimento observando-se as diferenças de porte das plantas em função das diferentes épocas de semeadura.

Para o controle do pulgão do milho (*Rhopalosiphum maidis* A.) que ocorreu em todos os tratamentos, no final da fase vegetativa e início da fase reprodutiva, foi aplicado o produto comercial Conect[®], (Imidacloprid 100 g L⁻¹ mais Beta-ciflutrina 12,5 g L⁻¹) fazendo-se duas aplicações com pulverizador costal, com intervalo de uma semana.

3.4 Crescimento e desenvolvimento da planta

3.4.1 Estádios fenológicos

O acompanhamento dos estádios fenológicos da cultura, foi efetuado a partir de um conjunto de cinco plantas por parcela, sorteadas logo após a semeadura, totalizando trinta plantas por tratamento, as quais foram acompanhadas ao longo da estação de crescimento. Os estádios fenológicos foram observados duas vezes ao dia. Para facilitar a identificação dos

estádios na fase vegetativa, as folhas foram marcadas com barbante de algodão, observando-se e registrando-se todos os estádios desde a emergência (VE) até a maturidade fisiológica (R6), sempre que 50% ou mais do total das plantas observadas apresentavam a caracterização do evento determinada.

Para Ritchie *et al.*, (1993), o sistema de identificação empregado divide o desenvolvimento da planta em vegetativo (V) e reprodutivo (R), conforme mostra a Tabela 2. As subdivisões dos estádios vegetativos são designadas numericamente como V1, V2, V3 até V(n); em que (n) representa a última folha emitida, antes do pendoamento (VT). O primeiro e o último estádios vegetativos são representados, respectivamente, por VE (emergência) e VT (pendoamento).

Tabela 2. Estádios vegetativos e reprodutivos da planta de milho.

Vegetativo	Reprodutivo
VE , Emergência	R1 , florescimento
V1 , 1ª folha desenvolvida	R2 , grão leitoso
V2 , 2ª folha desenvolvida	R3 , grão pastoso
V3 , 3ª folha desenvolvida	R4 , grão farináceo
V4 , 4ª folha desenvolvida	R5 , grão farináceo duro.
V(n) , enésima folha desenvolvida.	R6 , Maturidade fisiológica
VT , pendoamento	

3.4.2 Variáveis de crescimento

As amostragens, para determinação da matéria seca, foram feitas nos estádios fenológicos V3, V4, V6, V8, V10, V12, V14, V16 e R1 a R6, iniciando sempre nas primeiras horas do dia, com a coleta de doze plantas por tratamento, sorteadas previamente, que foram levadas ao laboratório e separadas em seus componentes, (folhas, bainhas, folhas do cartucho, colmos, brácteas, grãos, ráquis e pendões). Depois de separado, o material vegetal foi identificado, acondicionado em sacos de papel e levado a estufa a 68 °C com ventilação forçada, permanecendo até que a massa de todas as partes da planta apresentasse valor constante. A determinação da massa seca foi feita através de balança digital semi-analítica, no laboratório, sendo calculada a massa seca por parte, por planta e total por hectare.

Na determinação do índice de área foliar (IAF), as lâminas foliares verdes ou com mais de 30% de área verde, das 12 plantas coletadas por tratamento e por amostragem, foram

medidas em seu comprimento e largura máximos. A área foliar foi então, calculada pelo produto do comprimento pela largura do limbo da folha corrigido pelo fator de ajuste. Este fator foi determinado por Montgomery em 1911 e vem sendo usado na determinação da área foliar de genótipos de milho, por vários pesquisadores (VIEIRA JUNIOR *et al.*, 1998; MANDONI & OTEGUI, 1996). Pesquisas desenvolvidas por Martins (2002) comprovaram, experimentalmente em plantas de milho cultivadas na região de Rio Largo/AL, que o valor para o fator de correção para o cálculo da área foliar de genótipos de milho foi 0,75. De posse da área foliar por planta, definiu-se o índice de área foliar (IAF), a partir da relação entre o total de área foliar pela área ocupada pelas plantas, o qual é resultado da disposição espacial das folhas, como consequência da distribuição das plantas (VIEIRA JUNIOR *et al.*, 2006). O cálculo do IAF diário foi feito a partir da interpolação (Kiniry *et al.*, 1989) entre os valores medidos através do programa computacional ORIGIN 6.0.

A área foliar específica (AFE) foi determinada pela relação da área das folhas pela massa seca das mesmas (Benincasa, 2003), para cada tratamento e repetição, e expressa em $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ e a taxa de crescimento da cultura (TCC), pela relação entre a massa seca acumulada, por unidade de área, em m^2 , dividida pelo tempo, em dias decorridos da emergência até a data da amostragem.

Para mensurar a profundidade efetiva do sistema radicular, foram abertas seis trincheiras definidas ao acaso em cada parcela do tratamento T4, transversal a fileira de milho e distando 0,09 m do colo da planta, na época do florescimento. As trincheiras mediam 1,0 m de largura por 1,20 m de comprimento por 1,20 m de profundidade. Para a retirada das amostras utilizou-se a técnica do monólito com tábua com pregos Böhm (1979). Cada tábua media 0,45 m de largura por 0,60 m de comprimento com pregos de 3" x 9 dispostos a cada 0,05 m. A tábua foi cravada na parede da trincheira tomando como centro a planta de milho, que foi cortada ao nível do solo. Em seguida, o solo foi escavado a uma distância de 0,18 m da parede da trincheira até a profundidade de 0,60 m, permitindo a retirada do monólito de 0,45 m de largura por 0,60 m de profundidade por 0,18 m de espessura (Figura 3). Visando atingir a profundidade de 0,90 m, um outro monólito foi retirado na profundidade subsequente (0,60 m a 0,90 m), com a mesma espessura e largura. Os monólitos foram imediatamente levados a um galpão onde tiveram as suas medidas adequadas, com uma espátula, e posteriormente foram submetidos a lavagem, com jato de água fraco, permitindo a separação das raízes. Após a remoção do solo, as tábuas com as raízes foram colocadas na geladeira e posteriormente removeram-se as raízes de cada quadrícula de 0,15 m x 0,15 m, sendo estas acondicionadas em sacos de papel e levadas a estufa a 68 °C até a massa permanecer

constante. Posteriormente, foi feita determinação da massa das raízes, por pesagem em balança semi-analítica digital, para os perfis de 0,15 m em 0,15 m até 0,90 m de profundidade e efetuada a relação percentual de cada camada em relação à massa total, até a profundidade considerada (BASSOY *et al.*, 1994). Após todos esses procedimentos encontrou-se o valor de 0,60 m como indicativo da profundidade efetiva do sistema radicular do milho para as condições experimentais, onde nessa profundidade, encontrou-se 96,32% da massa seca de raízes (REICHARDT & TIMM, 2004).



Figura 3. Vista do monólito recortado na trincheira e sistema radicular do milho sobre a tábua com pregos, após a retirada do solo.

3.5 Variáveis agrometeorológicas

A precipitação pluvial foi mensurada por um pluviômetro automático (TB3, Hydrological Services PTY. LTD., Sydney, Austrália) instalado a 1,5 m acima do solo. As medidas de temperatura e umidade do ar foram obtidas por um termo higrômetro automático (HMP45C, Campbell Scientific, Logan, Utah), instalado a 2,0 m acima da superfície do solo. A soma dos graus-dias (GD), necessários para completar um subperíodo, ou atingir qualquer fase fenológica após semeadura foi calculada a partir da temperatura média do ar ($\bar{T}_i$), da temperatura base (T_b) e da duração em dias do subperíodo.

$$GD = \sum_{i=1}^n (\overline{T_i} - T_b) \quad (1)$$

em que: T_b é igual a 10 °C (GILMORE & ROGERS, 1958).

Os dados de radiação solar global (R_g) foram coletados por um piranômetro (Preto e branco da EPPLEY, U.S.A.). Todos os equipamentos integravam uma estação agrometeorológica, localizada em uma área contígua ao experimento, provida de unidade armazenadora de dados e placa de modem para captura dos dados à distância. Os registros foram feitos a cada minuto e posteriormente integrados para o período horário e diário.

3.6 Caracterização físico-hídrica

3.6.1 Umidade do solo

As amostragens para a avaliação dos atributos físicos do solo ocorreram em setembro de 2008. A coleta das amostras foi efetuada em uma trincheira dentro da área experimental, nas camadas de 0,0 m a 0,15 m, 0,15 m a 0,30 m, 0,30 m a 0,45 m, 0,45 m a 0,60 m, 0,60 m a 0,75 m e 0,75 m a 0,90 m de profundidade.

Para a determinação da densidade de partículas (D_p) foram coletadas amostras deformadas a cada intervalo de 0,15 m de profundidade com três repetições, que após secas ao ar e peneiradas ($\varnothing = 2$ mm) foram levadas à estufa por 48 horas, para posterior determinação da D_p pelo método do balão volumétrico. Em seguida foram calculadas as D_p para as profundidades de 0,0 m a 0,30 m, 0,30 m a 0,60 m e 0,60 m a 0,90 m a partir da média das densidades entre cada dois intervalos de 0,15 m.

A densidade do solo (D_s) foi determinada a partir de três amostras por intervalo de profundidade de 0,15 m até 0,90 m, totalizando 18 amostras coletadas com o uso do amostrador de Uhland, as quais foram colocadas na estufa a 105 °C até a massa constante, sendo em seguida determinada a densidade do solo (EMBRAPA, 1997). A determinação da umidade na saturação (θ_s) foi feita pela estimativa da porosidade total (α) a partir da seguinte relação matemática:

$$\alpha = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (2)$$

A umidade residual (θ_r) foi determinada a partir das amostras de terra fina seca ao ar para os intervalos 0,15 m de profundidade até 0,90 m, colocadas na estufa a 105 °C até a massa constante e posterior determinação da umidade pelo método gravimétrico, considerando a densidade da água como 1 g cm⁻³ e a densidade do solo, para cada intervalo peculiar do perfil analisado.

Para a determinação da curva característica de umidade do solo foram coletadas, com o uso do amostrador de Uhland, em cilindros com dimensões 0,030 m de altura por 0,054 m de diâmetro interno, 15 amostras por cada intervalo de profundidade de 0,15 m, equivalendo a cinco tensões com três repetições cada, perfazendo um total de 90 amostras.

Após a coleta, as amostras foram embrulhadas com filme de alumínio e embainhadas em parafina, sendo posteriormente armazenadas sob refrigeração mantendo-se, assim, o mínimo de alteração das condições naturais do solo. No laboratório, as amostras foram preparadas, retirando-se o excesso de solo com uma espátula e colocadas para saturação, com água destilada por um período de 24 horas, em uma bandeja plástica e, em seguida, submetidas à tensão de interesse, na câmara de pressão de Richards, para as tensões de 30, 100, 500, 1000 e 1500 kPa, (LIBARDI, 2005). As amostras foram mantidas nas câmaras de pressão, pelo tempo necessário para atingir o equilíbrio, ou seja, o momento em que não mais houvesse drenagem de água.

O ajuste das curvas de retenção da água no solo se deu com base na equação de Van Genuchten (1980), utilizando-se o software HIDRUS 1D. A equação considera o potencial mátrico (Ψ_m), como variável independente e a umidade volumétrica (θ), como variável dependente:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\alpha |\Psi_m|^n\right)\right]^m} \quad (3)$$

em que: θ_r , é a umidade volumétrica residual (cm³ cm⁻³); θ_s é a umidade volumétrica saturada (cm³ cm⁻³); $|\Psi_m|$ é o potencial mátrico (kPa) e α , m , n são os parâmetros empíricos da equação (Tabela 3).

A umidade da capacidade de campo (θ_{cc}), para a tensão de 10 kPa, foi estimada pela equação de ajuste da curva característica da umidade do solo. O conteúdo de água no solo foi registrado a cada cinco minutos através de um equipamento TDR, modelo CS616 Water Content Reflectometers, Campbell Scientific, Inc., ligado a um sistema de aquisição CR10X,

programado para fazer medidas a cada 10 segundos e armazenar a média a cada cinco minutos.

Tabela 3. Valores de n , m , α , θ_r , θ_s e R^2 encontrados para a equação de van Genuchten para as camadas de solo de 0,0 m a 0,3 m e 0,3 m a 0,6 m de profundidade de solo.

Prof (cm)	n	M	α	θ_r	θ_s	R^2
0-30	1,0050	0,2632	65,6659	0,0468	0,4048	0,9998
30-60	1,0050	0,1225	640,4731	0,0189	0,3903	0,9991

A informação de conteúdo de água foi obtida por uma sonda sensível a constante dielétrica do meio, composta de um dispositivo elétrico ligado por cabos a duas hastes de aço, que transmite uma onda (SOUZA *et al.*, 2006). O tempo decorrido, entre a emissão e o retorno do pulso elétrico, varia com o conteúdo de água no solo. O sistema elétrico funcionava a partir de corrente contínua, fornecida por uma bateria que era alimentada por um painel fotovoltaico SOLAREX, modelo NSX10.

Foi sorteada uma parcela por tratamento para a instalação das sondas de medição do TDR. As sondas mediam 0,30 m de comprimento e foram posicionadas verticalmente no solo, entre as plantas, dentro da fileira sorteada para avaliação da produção, posicionadas nas profundidades de 0,0 m a 0,30 m e 0,30 m a 0,60 m de profundidade, concordando com Kang *et al.* (2000).

Para a instalação das sondas, foram abertos furos no solo, com escavadeira manual, até a profundidade desejada, tendo-se o cuidado de colocar o solo sobre manta plástica, obedecendo a ordem de retirada e, após a fixação da sonda, recolocando-o na mesma ordem da retirada. Os cabos foram enterrados e ligados ao sistema de captura CR10X abrigado em caixa própria, fixada em haste metálica e posicionada dentro da área experimental.

A calibração do TDR foi feita a partir do umedecimento de solo, com a aplicação de 200 L de água em uma área de aproximadamente 2 m², delimitada por uma taipa, onde se encontravam instaladas as sondas a cada 0,30 m de profundidade. Posteriormente, a área foi coberta com um plástico branco e quatro horas após foi coletado o primeiro conjunto de amostras para a determinação da umidade gravimétrica, na condição muito úmida ou próxima a saturação. Após 48 horas, reiniciou-se a coleta das amostras de solo próximo às sondas, com o objetivo de estabelecer a relação entre a leitura do período (P) do TDR e a correspondente umidade do solo medida pelo método gravimétrico. Foram realizadas amostragens no local,

utilizando uma sonda desenvolvida para tal fim (Figura 4), nas mesmas profundidades onde se encontravam as sondas. Foram retiradas três amostras para cada intervalo de 0,10 m até a profundidade de 0,90 m, em sete intervalos de tempo, considerando o primeiro próximo à saturação, cinco intervalos intermediários e um próximo a umidade residual. Como as sondas mediam 0,30 m, foi feita a média aritmética das umidades volumétricas para cada intervalo de 0,30 m de profundidade.



Figura 4. Amostragem de solo para calibração das leituras do TDR. A) sonda de coleta das amostras; B) coleta das amostras e C) acondicionamento do solo em latas de alumínio plastificadas, para envio ao laboratório.

As amostras de solo foram coletadas nas primeiras horas da manhã, sendo acondicionadas em latas de alumínio e plastificadas, para minimizar as perdas de umidade no momento da coleta e transporte. Imediatamente após, as amostras foram conduzidas ao laboratório para a determinação da umidade volumétrica (EMBRAPA, 1997).

A partir do conjunto de dados de umidade volumétrica (θ) e leituras do período (μs), do TDR, registradas no mesmo horário da coleta das amostras, foram ajustadas curvas de calibração (Figura 5), e as respectivas equações para as profundidades de 0,0 m a 0,30 m e 0,30 m a 0,60 m.

Os dados foram tabulados e ajustados, considerando a umidade como variável dependente e o período como variável independente. Posteriormente foram submetidos ao tratamento matemático através do programa computacional ORIGIN 6.0[®] pelo modelo polinomial do segundo grau (Campbell, 2004), cujos valores estão na Tabela 4, sendo encontrada a seguinte equação:

$$\theta = a - bP + cP^2 \quad (4)$$

em que: θ , é a umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); e P , o período (μs $0,3 \text{ m}^{-1}$) e a , b e c os parâmetros empíricos do modelo.

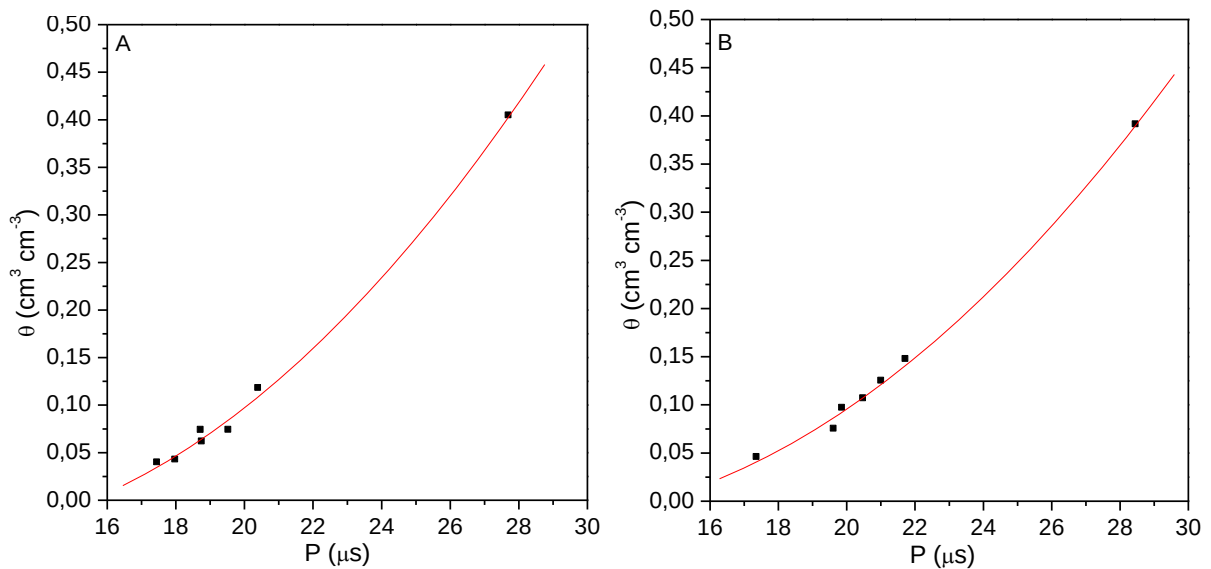


Figura 5. Curva de Calibração da umidade volumétrica do solo (θ) obtida por gravimetria em relação ao período (P) da onda do refletômetro em micro segundos. A) profundidade de 0,0 m a 0,30 m e B) profundidade de 0,30 m a 0,60 m.

Ao longo do período experimental, os dados referentes ao período (P) registrados a cada cinco minutos foram coletados, através do módulo e armazenados em disco rígido e, posteriormente, transformados em umidade do solo a partir da equação (4) de ajuste das leituras do período do TDR. Em seguida, os valores da umidade do solo (θ) foram integrados para o período horário e diário, utilizando planilhas do Microsoft Office Excel[®].

Tabela 4. Valores dos coeficientes a , b , c e R^2 encontrados para a equação polinomial para as camadas de solo de 0,0 m a 0,3 m e 0,3 m a 0,6 m de profundidade de solo.

Profundidade (cm)	A	b	c	R^2
0-30	0,1228	-0,0309	0,0015	0,997
30-60	0,1927	-0,0327	0,0014	0,997

De posse dos dados de umidade, foram calculados os armazenamentos de água no solo para a profundidade de 0,0 m a 0,60 m para períodos horários e diários, para cada tratamento, durante a estação de crescimento da cultura.

A determinação do armazenamento de água do solo, correspondente a capacidade de água disponível, CAD, foi efetuado pelo produto da diferença das umidades na capacidade de campo (θ_{cc}), e do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), pela profundidade efetiva do sistema radicular considerada (0,60 m). A água facilmente disponível, AFD, foi calculada considerando o limite de 55% de rebaixamento do armazenamento da CAD (ALLEN *et al.*, 1998).

3.6.2 Evapotranspiração

Os conceitos sobre a obtenção da evapotranspiração foram aqueles estabelecidos por Allen *et al.*, (1998) no Boletim da FAO 56, onde são obtidos os termos evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c) e evapotranspiração real (ET_r). Optou-se pelo uso do K_c dual, uma vez que esse procedimento é mais apropriado para o desenvolvimento de trabalhos de pesquisas, onde as variações da umidade na superfície do solo são importantes para a determinação da evapotranspiração.

Os valores da ET_o (mm dia⁻¹) foram obtidos através do método de Penman-Monteith-FAO 56, conforme a fórmula a seguir:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \left(\gamma \frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e)}{\Delta + \left[\gamma (1 + 0,34 u_2) \right]} \quad (5)$$

em que: Δ = inclinação da curva da pressão de vapor saturado versus temperatura do ar (kPa °C⁻¹); R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹); G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ = coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹); T é a temperatura do ar (°C); u₂ é a velocidade do vento a 2m e altura (m s⁻¹); e_s é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa) e e é a pressão do vapor d'água do ar (kPa).

A Evapotranspiração da cultura (ET_c), foi calculada pela seguinte expressão:

$$ET_c = ET_o K_c \quad (6)$$

em que: K_c é o coeficiente de cultura.

O valor de K_c foi determinado pela expressão.

$$K_c = K_{c_b} + K_e \quad (7)$$

em que: K_{c_b} é o valor do coeficiente basal da cultura que reflete a transpiração e K_e é o coeficiente de evaporação da superfície do solo.

Os valores de K_{c_b} para a cultura do milho, tabelados no boletim FAO 56 (Allen *et al.*, 1998), que correspondem a 0,15 referente ao período inicial (intervalo de 12 a 15 dias), 1,15 referente ao período intermediário (intervalo de 35 a 38 dias) e 0,50 referente ao período final (intervalo de 28 a 31 dias), foram ajustados levando-se em conta a velocidade do vento, a umidade relativa e a altura da planta, utilizando a seguinte equação:

$$K_{c_b} = K_{c_{b(Tab)}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \quad (8)$$

em que: $K_{c_{b(Tab)}}$ é o coeficiente de cultura basal tabelado; u_2 é a velocidade média diária do vento a 2 m de altura, durante os períodos intermediário e final em $m\ s^{-1}$ para $1\ m\ s^{-1} \leq u \leq 6\ m\ s^{-1}$; RH_{min} é a média de umidade relativa mínima durante os períodos intermediário e final, em %, para $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$ e h a altura de planta para os períodos intermediário e final em m.

Os valores de $K_{c_{b(i)}}$ para qualquer dia (L) do ciclo da cultura, foram calculados a partir da expressão:

$$K_{c_{b(i)}} = K_{c_b} + \left[\frac{i - \sum L_{(ant)}}{L_{(periodo)}} \right] (K_{c_{b(prox)}} - K_{c_{b(ant)}}) \quad (9)$$

em que: $K_{c_{b(i)}}$ é o coeficiente basal no dia i ; i é o número do dia do período de crescimento; $L_{(período)}$ é a duração do período; $\sum L_{(ant)}$ é o somatório das durações dos períodos anteriores; $K_{c_{b(ant)}}$ é o coeficiente de cultura do período anterior e $K_{c_{b(prox)}}$ é o K_{c_b} do próximo período.

O coeficiente de evaporação K_e foi calculado a partir da seguinte equação:

$$K_e = Kr(K_{c_{\max}} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c_{\max}} \quad (10)$$

em que: $K_{c_{\max}}$ é o coeficiente de cultivo máximo após uma chuva; K_r é o coeficiente de redução da evaporação, dependente da depleção da água na superfície do solo e f_{ew} é a fração do solo úmido exposto.

O coeficiente de cultivo máximo ($K_{c_{\max}}$), foi determinado pela equação:

$$K_{c_{\max}} = \max \left(\left\{ 1,2 + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \right\}, \{K_{c_b} + 0,05\} \right) \quad (11)$$

em que: h é a altura máxima média durante o período calculado (m); $\max()$ é o valor máximo dos parâmetros na chave $\{ \}$ separados por vírgula.

O valor de $K_{c_{\max}}$ será sempre maior ou igual ao valor de $K_{c_b} + 0,05$, pois a superfície do solo molhado sempre aumentará o valor de K_{c_b} em 0,05.

O coeficiente de redução da evaporação do solo K_r , foi calculado a partir da equação:

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \text{ para } D_{e,i-1} > REW \quad (12)$$

em que: $D_{e,i-1}$ é a evaporação da camada superficial do solo no final do dia $(i - 1)$ em mm; TEW é evaporação máxima acumulada a partir da superfície do solo quando $K_r = 0$ (TEW é água total evaporável) em mm; REW é a evaporação no final do estágio 1 (REW = água facilmente evaporável). Nesse estágio a evaporação é regida pela disponibilidade de energia do meio sendo a evaporação máxima.

A máxima evaporação acumulada a partir da superfície do solo TEW em mm, foi calculada a partir da equação:

$$TEW = 1000(\theta_{CC} - \theta_{PM})Ze \quad (13)$$

em que: θ_{cc} é o conteúdo de água na capacidade de campo em $m^3 m^{-3}$; θ_{PM} é o conteúdo de água no ponto do murchamento em $m^3 m^{-3}$ e Ze é a profundidade em m da camada de solo a partir da superfície, a qual sofre evaporação. Em virtude do desconhecimento do valor de Ze procedeu-se conforme recomendação do Boletim FAO 56, tomando o valor como 0,10 m.

O cálculo de evapotranspiração real ET_r , em mm foi efetuado a partir da equação:

$$ET_r = ET_o Kc_{ajust} \quad (14)$$

em que: Kc_{ajust} é o valor do coeficiente de cultura Kc , ajustado para uma condição de umidade do solo, variável.

$$Kc_{ajust} = Kc + Kc_b Ks \quad (15)$$

em que: Ks o fator de depleção da transpiração dependente do conteúdo de água do solo.

O coeficiente de estresse Ks é determinado pela expressão:

$$Ks = \frac{TAW - Dr}{(1 - p)TAW} \quad (16)$$

em que, Dr é a depleção da umidade na zona radicular em mm; TAW é a água disponível total na zona radicular considerada como capacidade de água disponível (CAD), em mm; p é a fração de água disponível total que a planta pode extrair sem sofrer estresse sendo considerada como água facilmente disponível (AFD), sendo 55% para o milho (ALLEN *et al.*, 1998).

A água disponível total na zona radicular, TAW foi obtida através da fórmula:

$$TAW = 1000(\theta_{cc} - \theta_{PM})Zr \quad (17)$$

em que: θ_{cc} é o conteúdo de água na capacidade de campo em $m^3 m^{-3}$; θ_{PM} é o conteúdo de água no ponto do murchamento em $m^3 m^{-3}$ e Zr é a profundidade efetiva do sistema radicular em m.

A água facilmente disponível (AFD), na zona radicular, admitida como RAW, em mm é obtida pela seguinte equação:

$$RAW = p TWA \quad (18)$$

A determinação da evaporação E, em mm foi feita através da expressão:

$$E = K_e ETo \quad (19)$$

O cálculo da transpiração, T, em mm foi efetuado pela equação:

$$T = ETr - E \quad (20)$$

O escoamento superficial foi estimado, a partir de um modelo semi-empírico descrito por Campbell & Diaz (1988), baseado em que essa variável do balanço hídrico, aumenta com o aumento da precipitação diária, na medida em que a precipitação venha a ser maior que a infiltração e o armazenamento da superfície do solo. O solo apresenta boa drenagem, com textura média a grossa e a cultura foi semeada em fileiras contínuas. Para essas condições o parâmetro “S”, do escoamento superficial, calculado por Stewart em 1976, assume o valor de 0,16, sendo o escoamento superficial calculado, como segue:

$$R = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (21)$$

em que: R é o escoamento superficial em m.; P é a precipitação pluvial em m, para a condição de que: se $P \leq 0,2 S$, então o escoamento superficial será zero.

3.7 Eficiência no uso da água

A eficiência no uso da água, (EUA), foi estimada por meio de regressão linear, forçada a passar pela origem, entre os valores da massa seca acumulada (kg ha^{-1}) e a água consumida no período, correspondente a evapotranspiração real convertida para $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$. A eficiência no

uso da água para o rendimento econômico foi definida pela relação entre a produção de grãos e a água consumida durante todo o ciclo da cultura (ZHANG *et al.*, 2004).

3.8 Eficiência no uso da radiação

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}) pelo dossel em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ foi calculada de acordo com a metodologia apresentada por Bonhomme *et al.* (1982):

$$RFA_{abs} = 0,972\ RFA\ [1 - e^{(-0,628 \times IAF)}] \quad (22)$$

em que: 0,972 é a fração da radiação interceptada que foi absorvida; RFA é a radiação fotossinteticamente ativa incidente em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$; 0,628 é o coeficiente de extinção da luz (k) e IAF é o índice de área foliar em $m^2\ m^{-2}$.

A fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada que foi absorvida está de acordo com pesquisas desenvolvidas por Lindquist *et al.* (2005), trabalhando com híbridos de milho e o coeficiente de extinção do dossel foi encontrado por Ferreira Junior (2007), para dois cultivos de milho desenvolvidos, em condições semelhantes, na região de Rio Largo - AL. Esse valor de k mostrou-se dentro da faixa encontrada por Maddonni & Otegui (1996), que variou de 0,46 até 0,64 para diferentes híbridos de milho.

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi calculada como uma fração da radiação global definida pela inclinação da reta da equação de regressão linear, estabelecida pela relação entre a radiação solar global e a radiação solar fotossinteticamente ativa (Figura 6), medidas durante um período de 68 dias, na área experimental, durante a estação de crescimento da cultura.

O cálculo da eficiência do uso da radiação (EUR) foi feito pela relação entre a massa seca da parte aérea e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}), acumuladas até a data da amostragem correspondente a cada estágio fenológico estudado, em que a EUR se refere à eficiência no uso da radiação da cultura em $g\ MJ^{-1}$ de matéria seca. A EUR, para todo ciclo, foi estimada por meio da regressão linear, forçada a passar pela origem, entre a massa seca e a RFA_{abs} , até o estágio fenológico de grãos farináceos (R4).

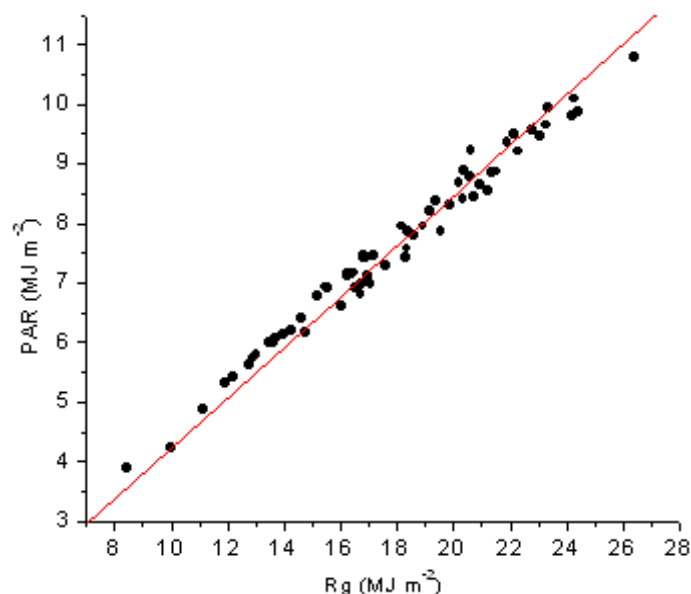


Figura 6. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa (RFA, MJ m⁻²) e Radiação global (Rg, MJ m⁻²) ($y = 0,423 (\pm 0,0017)x$, $r^2 = 0,99$), na região de Arapiraca-AL.

A eficiência no uso da radiação para o rendimento de grãos (EURr) foi estimada a partir da relação entre a produtividade de grãos a 13% de umidade, obtida para cada tratamento, e a RFA_{abs} acumulada durante a estação de crescimento da cultura.

3.9 Produtividade e componentes da produção

A produtividade de grãos foi obtida no ponto de maturidade fisiológica (R6). Neste estágio fenológico, duas fileiras de 7,50 m de comprimento, correspondendo a 66 plantas, foram colhidas em cada parcela. Em seguida foram medidas as alturas das plantas (cm), o comprimento e o diâmetro das espigas (cm), o número de espigas granadas por planta e o número de fileiras de grãos por espiga. As espigas foram debulhadas manualmente e uma amostra foi retirada, para determinação da umidade dos grãos e a produtividade final foi ajustada para 13% de umidade e expressa em kg ha⁻¹ de grãos. Para a determinação da massa específica dos grãos, foram retiradas amostras de grãos, as quais foram submetidas à secagem em estufa a 70 °C com ventilação forçada e pesadas em balança digital semi-analítica, para determinação da massa em g grão⁻¹.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fatores Ambientais

Os valores das temperaturas mínimas e máximas do ar para todos os tratamentos estiveram dentro da faixa ótima para a cultura do milho situando-se no intervalo de 10 °C (Vilanova *et al.*, 1972), e 32 °C (Fancelli & Dourado Neto, 2004), não se constituindo em fator de limitação para o crescimento e desenvolvimento do milho.

No tratamento T1, a temperatura máxima média noturna do ar ocorreu no 12º DAE e correspondeu a 22,6 °C e no tratamento T2, a máxima foi de 22,3 °C ocorrida no 14º DAE. Nos tratamentos T3 e T4 esse valor foi de 22,6 °C, ocorrido no 107º e 87º DAE, respectivamente. A temperatura mínima média noturna do ar foi de 18,2 °C ocorrida no 106º DAE para T1; no 93º DAE, para T2; no 71º DAE para T3 e no 51º DAE para T4. Portanto, as temperaturas médias noturnas do ar estiveram, durante todo tempo e em todos os tratamentos, abaixo de 24 °C (Figura 7), não se constituindo em fator limitante ao acúmulo de fotoassimilados (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004).

As temperaturas médias diurnas do ar mantiveram-se, durante toda estação de crescimento, dos quatro tratamentos, abaixo de 32 °C. A temperatura mínima diurna foi de 21,11 °C, ocorrida no 66º DAE no tratamento T1, no 53º DAE no tratamento T2, no 31º DAE no tratamento T3 e no 11º DAE para o tratamento T4. A máxima média diurna foi de 26,12 °C, registrada no 111º DAE no tratamento T1 e no 98º DAE para o tratamento T2, enquanto T3 e T4 registraram a máxima de 28,30 °C nos 106º DAE e 86º, DAE, respectivamente.

Os valores das temperaturas do ar diárias máximas absolutas, registradas a cada 10 minutos, mostram que nenhum valor ultrapassou o limite de 37 °C por mais de três horas, enquanto as médias noturnas mantiveram-se sempre abaixo 24 °C (Durães, 2007), para as quatro épocas de semeadura. Isso indica que os limites de temperatura do ar estiveram dentro dos patamares adequados ao bom desenvolvimento da cultura, não se apresentando como fator de depleção da produção.

Os valores da precipitação pluvial acumulada, para todo o ciclo, variaram de 571,50 mm, para o tratamento T1, a 341,12 mm (Tabela 5) para o tratamento T4. Os tratamentos T2 e T3 tiveram 470,14 mm e 385,83 mm de precipitação pluvial, respectivamente. Verificou-se que a distribuição dos totais da precipitação pluvial, nos tratamentos, foi decrescente, à medida que as épocas de semeadura tornaram-se mais tardias.

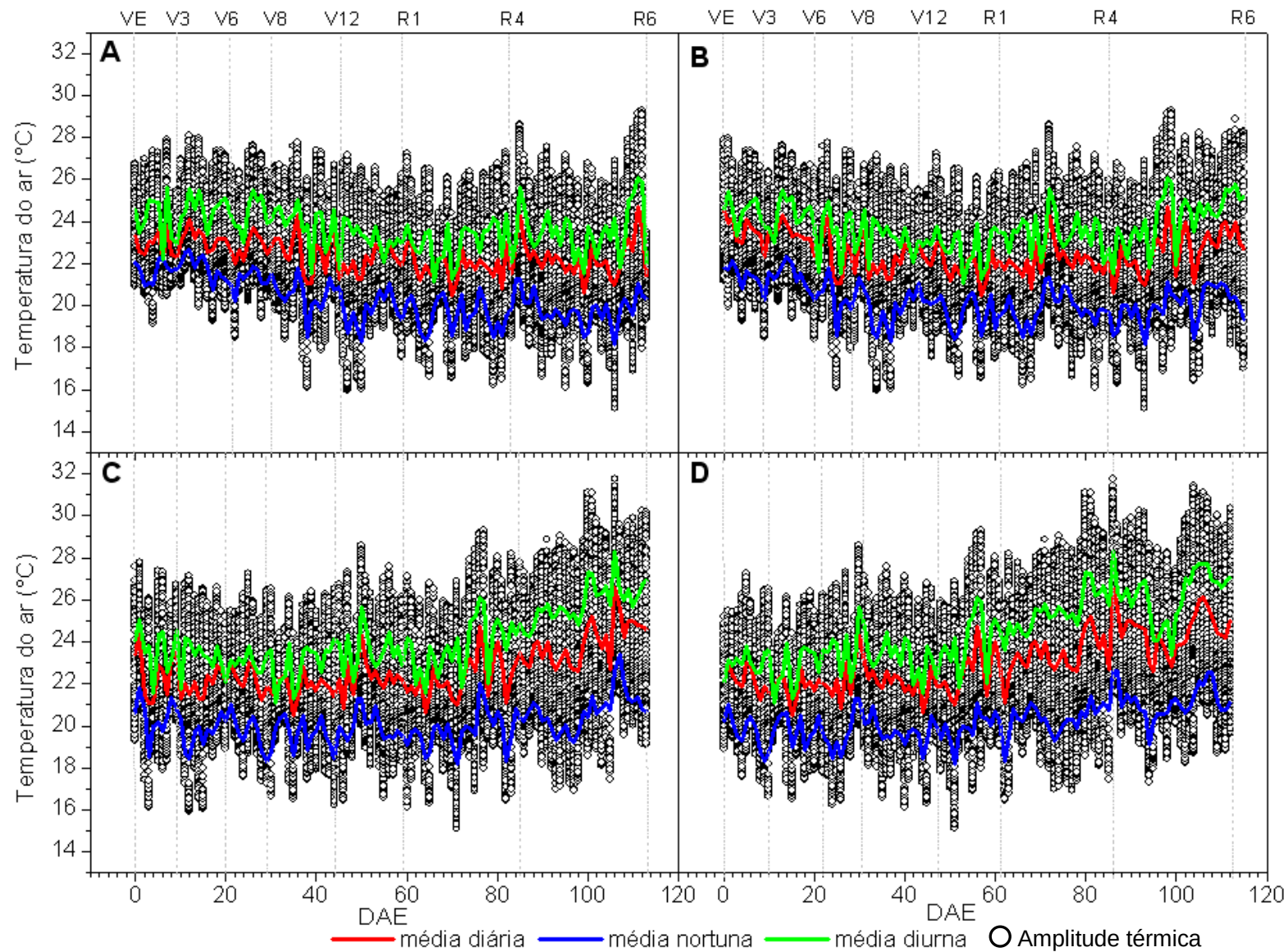


Figura 7. Temperatura do ar (°C) média diária, diurna, noturna e amplitude térmica, em função dos dias após a emergência (DAE) para as quatro épocas de semeadura [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e T4 30/06/08 (D)] e fases fenológicas do milho (VE a V6).

Foram registrados, para o tratamento T₁, 103 dias com chuvas, o que representa 91% dos dias do ciclo, com precipitações pluviais, significando uma frequência de um evento por dia com uma intensidade média, no período, de 5,55 mm dia⁻¹.

No tratamento T₂, verificou-se uma precipitação total de 470,14 mm durante a estação de crescimento, compreendidos no período de 83% dos dias do ciclo total da cultura. A intensidade média de precipitação foi de 4,90 mm dia⁻¹. O tratamento T₃ teve um ciclo de 113 dias com uma precipitação pluvial total, durante o período, de 385 mm, ocorridos em 80% dos dias do ciclo da cultura. A intensidade de precipitação foi de 4,82 mm dia⁻¹. O tratamento T₄, correspondente à última época de semeadura, apresentou um ciclo de 112 dias com uma precipitação pluvial total de 341,12 mm, sendo este total distribuído durante 70 dias, com uma intensidade média de 4,87 mm dia⁻¹.

Xavier & Dornellas (2005), analisando uma série histórica pluviométrica, do período de 1971 a 2000, identificaram que nos meses de maio, junho e julho, ocorrem chuvas acumuladas acima de 100 mm em mais de 50% dos anos. O mês de junho se mostrou como o mês mais chuvoso, em Arapiraca, sendo o único a não apresentar ocorrência de chuva acumulada inferior a 50 mm, ou seja, em todos os anos da série, no mês de junho sempre choveu acima de 50 mm e, ainda, foi o mês com maior ocorrência de chuvas acumuladas superiores a 200 mm, correspondendo a 21% dos anos estudados.

Tabela 5. Dados da precipitação pluvial total, ciclo da cultura, número de dias com chuva, frequência de precipitação e intensidade de precipitação para as quatro épocas de semeadura (T₁, T₂, T₃ e T₄) na estação de crescimento da cultura.

PARÂMETROS	TRATAMENTOS			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Precipitação total (mm)	571,50	470,14	385,83	341,12
Ciclo da Cultura (DAE)	113	115	113	112
Número de dias com chuva	103	96	80	70
Frequência de Precipitação (dias)	1,10	1,20	1,41	1,60
Intensidade de Precipitação (mm dia ⁻¹)	5,55	4,90	4,82	4,87

Verifica-se que os tratamentos T₂, T₃ e T₄ apresentaram totais de precipitações pluviais 17,7%, 32,5% e 40,3% inferiores ao total registrado para a primeira época de semeadura (T₁),

respectivamente. Apenas o valor da precipitação do tratamento T4 esteve abaixo do intervalo de 350 a 500 mm, citado por Fancelli & Dourado Neto (2004), para a cultura do milho.

4.2 Análise hídrica

4.2.1 Coeficiente de cultura basal (K_{cb})

A cultura do milho apresenta um período crítico, para a exigência hídrica, compreendido no intervalo entre 15 dias antes e 15 dias após o florescimento. Por ser uma planta C_4 o milho praticamente não apresenta saturação por radiação solar, porém no período crítico, a cultura é sensível a déficit hídrico podendo-se observar esta sensibilidade no início da formação do zigoto e na fase do enchimento dos grãos. A alta sensibilidade nestes estágios coincide com a elevada taxa transpiratória, em razão dos maiores índices de área foliar (BERGAMACHI *et al.*, 2004). A demanda hídrica, da área cultivada, está relacionada à disponibilidade de água no solo e as condições atmosféricas no ambiente, que permitem o estabelecimento do fluxo de água através do contínuo solo planta atmosfera. A evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) parametrizada por Allen *et al.* (1998), prevê a utilização do coeficiente de cultura (K_c) e a evapotranspiração de referência (E_{To}).

Os valores de K_c basal (K_{cb}) corrigidos para as condições locais de umidade relativa e velocidade média do vento a 2 m de altura são mostrados na Figura 8, conforme metodologia desenvolvida por Allen *et al.* (1998), para os quatro tratamentos. Os valores de K_{cb} , para o tratamento T1, foram 0,15, 1,05 e 0,40 (Tabela 6), correspondentes aos valores inicial, intermediário e final, respectivamente.

Tabela 6. Datas de semeadura, colheita e valores de K_{cb} corrigidos para os quatro tratamentos em função da umidade relativa mínima média e velocidade média do vento.

TRATAMENTOS	DATAS		K_{cb} corrigido			Velocidade do vento ($m s^{-1}$)	Umidade Relativa Mínima (%)
	Semeadura	Colheita	Inicial	intermediário	Final		
T1	6/mai/08	1/set/08	0,15	1,05	0,40	1,57	67
T2	19/mai/08	16/set/08	0,15	1,06	0,41	1,59	66
T3	10/jun/08	6/out/08	0,15	1,07	0,42	1,59	63
T4	30/jun/08	24/out/08	0,15	1,10	0,45	1,68	56

O valor do K_{cb} inicial não sofre correção, no entanto os valores de K_{cb} do período intermediário e final foram 8,7% e 20% menores do que aos valores tabelados. Esta variação decorre da umidade relativa mínima média durante o período ter sido da ordem de 67%, enquanto a velocidade média do vento ficou em torno de $1,67 \text{ m s}^{-1}$. Como os valores tabelados foram calculados para 45% de umidade relativa mínima e velocidade do vento de 2 m s^{-1} . A maior umidade relativa e a menor velocidade do vento, quando comparados aos valores padrões do Boletim FAO 56, contribuem para a redução dos valores de K_{cb} .

Para o segundo tratamento (T2), semeado no dia 19 de junho e colhido no dia 16 de setembro, os valores de K_{cb} intermediário e K_{cb} final apresentam valores de 1,06 e 0,41, correspondendo a uma redução de 7,8% e 18,0% respectivamente. Para o tratamento T3 as variações foram da ordem de 7,0% e 16,0%, enquanto para o tratamento T4 as variações foram de 4,3% e 10,0%. Os valores de K_{cb} corrigidos se aproximaram mais dos valores tabelados, à medida que as datas de semeadura se tornaram mais tardias. Isso decorreu do aumento da velocidade média do vento e da redução da umidade relativa mínima do ar, que variou 11 pontos percentuais, para menos, entre o primeiro e o último tratamento.

4.2.2 Coeficiente de cultura ajustado ($K_{c_{ajust}}$)

Os valores de $K_{c_{ajust}}$ incorporam o fator de depleção da umidade do solo (K_s) e o fator de evaporação (K_e). Portanto o valor do $K_{c_{ajust}}$ será o valor de K_{cb} corrigido em função da evaporação da superfície do solo e do teor de água nele contido, regido pelas forças de tensão com que a água é retida no solo.

No tratamento T1, os valores de $K_{c_{ajust}}$ permaneceram acima de K_{cb} até 78 dias após a emergência (Figura 8A), próximo do estágio R4. Esse fato decorreu da intensidade e frequência de chuvas no período, mantendo a superfície do solo úmida e favorecendo a evaporação da água. O tratamento T2, (Figura 8B), teve comportamento semelhante e, os valores de $K_{c_{ajust}}$ permaneceram acima dos valores de K_{cb} desde a emergência (VE), até 65 dias após a emergência, um pouco depois do florescimento (R1), englobando todo o período inicial, de desenvolvimento e parte do período intermediário, denotando que para estes dois tratamentos a evaporação influenciou os valores de $K_{c_{ajust}}$, mantendo estes, acima do limite de K_{cb} . As maiores diferenças ocorridas nos períodos inicial e de desenvolvimento da cultura deve-se à maior exposição do solo, que ainda não está totalmente coberto pela cultura.

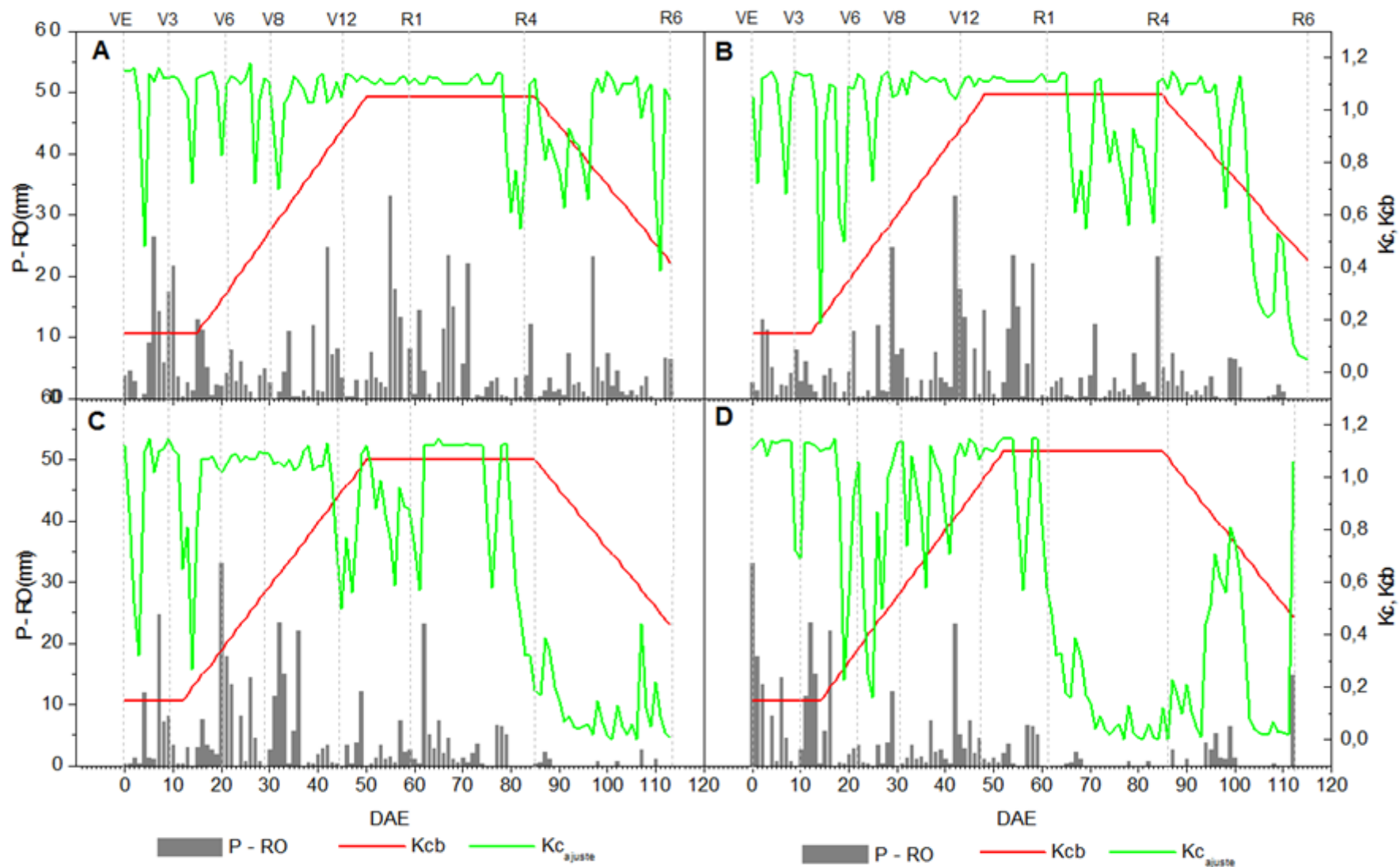


Figura 8. Coeficiente de cultura basal (K_{cb}), coeficiente de cultura ajustado (K_{c_ajuste}) e precipitação pluvial menos o escoamento superficial ($P-RO$) em função dos dias após a emergência (DAE) e dos estádios fenológicos do milho (VE a R6) para quatro épocas de semeadura de milho [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e T4 30/06/08 (D)].

Para os tratamentos T3 e T4, (Figuras 8C e 8D), observa-se um comportamento diferente, que é mais acentuado no tratamento T4, onde se verifica que, no início do período intermediário, por volta de 60 dias após a emergência e antes do florescimento, ocorre uma queda abrupta nos valores de $K_{c_{ajust}}$, decorrentes tanto da redução do coeficiente de evaporação (K_e) como do coeficiente de transpiração (K_s), em função de redução da umidade no solo e do aumento das forças de retenção da água, decorrentes da menor frequência e intensidade das precipitações pluviais. Ao final do ciclo, verifica-se ainda, uma elevação significativa dos valores de $K_{c_{ajust}}$, (Figura 8D), decorrente da ocorrência de chuvas e, tendo na componente evaporação a sua maior expressão, uma vez que a cultura já se encontrava com as folhas em adiantado estado de senescência.

4.2.3 Evapotranspiração real (ETr) e evapotranspiração da cultura (ETc).

A evaporação e a transpiração apresentaram ritmos de variação distintos, ao longo do período de crescimento da cultura, para os quatro tratamentos, Figura 9. Nos estádios fenológicos iniciais, compreendendo a emergência (VE) até o estágio de seis folhas (V6), a transpiração é baixa, sendo determinada principalmente pelo baixo IAF. No mesmo período a evaporação é alta, sendo regida pela grande exposição do solo, decorrente da baixa cobertura pela cultura, pela disponibilidade de umidade e de energia. Até o estágio fenológico V6 a evapotranspiração real (ETr) foi fortemente influenciada pela componente evaporação (E). A partir do estágio V6, com o aumento do IAF e da cobertura do solo, observa-se que a evaporação tende a diminuir e a transpiração a aumentar. A partir do estágio fenológico V12 a evaporação tende a ser mínima e a transpiração máxima e a ETr passa a ser regida, fortemente, pela demanda transpiratória. Nesse período, o milho passa a apresentar maiores exigências de água e maior susceptibilidade ao estresse hídrico. O período de baixa evaporação e alta transpiração volta a variar a partir do estágio de grãos farináceos (R4) desde que haja disponibilidade hídrica no solo. A partir desse estágio a evaporação volta a apresentar tendência crescente e a transpiração decrescente, pela redução do IAF e senescência das folhas. Tal comportamento se verificou nos tratamentos T1 e T2, nos quais a ocorrência de chuvas foi regular, mantendo a umidade da superfície do solo e a disponibilidade de água para a planta em níveis adequados. Para o tratamento T3, verifica-se uma queda expressiva na transpiração a partir dos 81 DAE, correspondendo ao 23º dia após o florescimento (R1), causando forte depleção na ETr a partir desse período, em função da redução nas precipitações.

Analisando-se o tratamento T4 (Figura 9 D), verifica-se que a redução na ETr regida, principalmente, pela componente transpiração, ocorre a partir de 61 DAE, coincidindo com o florescimento do milho (R1), apresentando valores baixos até os 94 DAE, próximo ao estágio

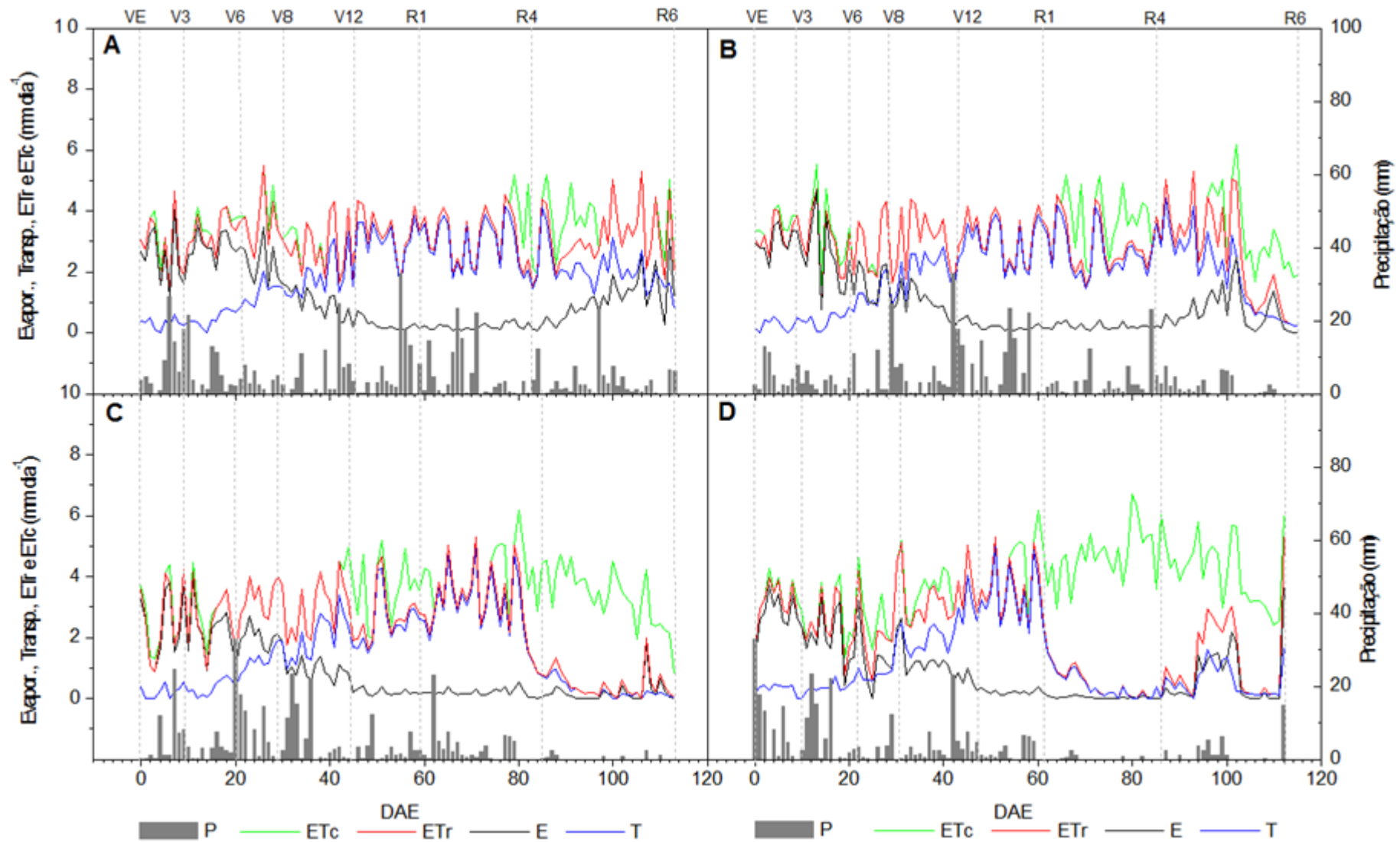


Figura 9. Precipitação pluvial (P), evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração real (ET_r), Evaporação (E) e transpiração (T) para quatro épocas de semeadura [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e T4 30/06/08 (D)].

fenológico R5 que ocorreu aos 96 DAE, englobando toda a segunda metade do período crítico da cultura do milho, compreendendo os 15 dias após o florescimento (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004). Quando ocorreram novas chuvas aos 94 DAE, a componente evaporação foi a principal determinante da ET_r , visto que, nesse período a planta já se encontrava próxima a maturidade fisiológica e a senescência foliar era marcante, agravada pelo estresse hídrico ocorrido no período.

Os resultados apresentados na Tabela 7, mostram os valores da evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração real (ET_r), evaporação (E) e Transpiração (T), no ciclo de cultivo para as quatro épocas de semeadura. Observando-se os valores de ET_c , verifica-se que o tratamento T4 apresentou o valor mais alto, correspondendo a 434,35 mm, sendo superior a T1 em 13,8%, a T2 12,4% e 12,7% em relação a T3. As variações entre os tratamentos T1, T2 e T3 foram pequenas, não ultrapassando os 1,4 pontos percentuais. Pode-se verificar que houve uma tendência de crescimento dos valores de ET_c , à medida que as épocas de semeadura se tornaram mais tardias. Sendo a ET_c um parâmetro que reflete o crescimento da cultura, em uma condição ambiental sem restrições hídricas na região do sistema radicular (Allen *et al.*, 1998), depreende-se que as condições do meio, como disponibilidade de energia, e as suas implicações na temperatura, umidade relativa e velocidade do vento foram determinantes para essa variação.

Tabela 7. Valores da Evapotranspiração da cultura (ET_c), Evapotranspiração real (ET_r), evaporação (E), transpiração (T), radiação Global (Rg) e precipitação pluvial (P) no ciclo de cultivo para as quatro épocas de semeadura de milho (T1, T2, T3 e T4).

Componentes agrometeorológicas	Tratamentos			
	T1	T2	T3	T4
Evapotranspiração da cultura (ET_c) em mm	381,65	386,6	385,42	434,35
Evapotranspiração real (ET_r) em mm	356,21	335,34	362,23	229,58
Evaporação (E) em mm	133,84	114,54	94,45	103,40
Transpiração (T) em mm	222,37	220,80	167,78	126,18
Radiação solar global (Rg) em MJ m ⁻²	1735,57	1861,07	1918,54	2046,92
Precipitação pluvial (P) em mm	571,50	470,14	385,83	341,12

Analisando-se os valores da ET_r , verifica-se que estes decresceram ao longo das épocas da semeadura. Na comparação dos valores de ET_c e ET_r , pode-se verificar que para o

tratamento T1, ETr foi 6,7% menor que ET_c, sendo 13,3% menor para T2, 32,0% menor para T3 e 47,1% menor para o tratamento T4. Portanto, ocorreu uma gradativa diferença entre ET_c e ETr a medida que as épocas de semeadura se tornaram mais tardias, sinalizando um crescente déficit hídrico. Quando a ETr é desdobrada nos componentes evaporação (E) e transpiração (T), observa-se que ambas decresceram a medida que as épocas de semeadura se tornavam mais tardias. Entretanto, nota-se que a transpiração (T) foi a componente que sofreu maior depleção, sendo para a quarta época de semeadura (T4) 43,3% menor que na primeira época (T1). Isso denota que as alterações do conteúdo de água no solo foram determinantes para a redução na evapotranspiração real (ETr). Para os mesmos tratamentos, a variação na depleção da evaporação foi de apenas 22,7%.

4.2.4 Armazenamento de água no Solo

O crescimento das plantas está na estreita dependência da habilidade com que as folhas capturam a energia fotossinteticamente ativa, otimizando o uso de radiação solar e da capacidade com que as raízes absorvem água e nutrientes, permitindo que os processos de transpiração e fotossíntese ocorram de forma a permitir a captura e fixação do CO₂, para a produção da fotoassimilados. Dentre os componentes abióticos que influenciam a produção, a disponibilidade de água no solo e a radiação, se constituem em fatores extremamente importantes para expressão do potencial genético das culturas.

Da emergência até o estágio fenológico de 12 folhas, não houve déficit hídrico (Figura 10), para as quatro épocas de plantio. Apenas no tratamento T4 ocorreu um dia cujo armazenamento esteve abaixo do limite da água facilmente disponível (AFD), correspondendo 42° DAE, cujo armazenamento foi de 55,9 mm. Esse valor representou um rebaixamento da capacidade de água disponível do solo (CAD), de 62%. Com isso as plantas apresentaram crescimento e desenvolvimento semelhantes, até o estágio fenológico V12.

No período de 15 dias que antecedeu o pendoamento (VT), observou-se que as variações do armazenamento de água no solo foram baixas. Nos tratamentos T1, T2 e T3 o armazenamento esteve durante todo o período no intervalo da AFD, ou acima da capacidade de campo. Observaram-se no tratamento T4 dois dias com valores de armazenamento abaixo da AFD, correspondendo aos 56° e 57° DAE, cujos valores do armazenamento variaram de 56,53 mm a 53,25 mm, o que equivale a rebaixamento na CAD de 60% e 70%, respectivamente.

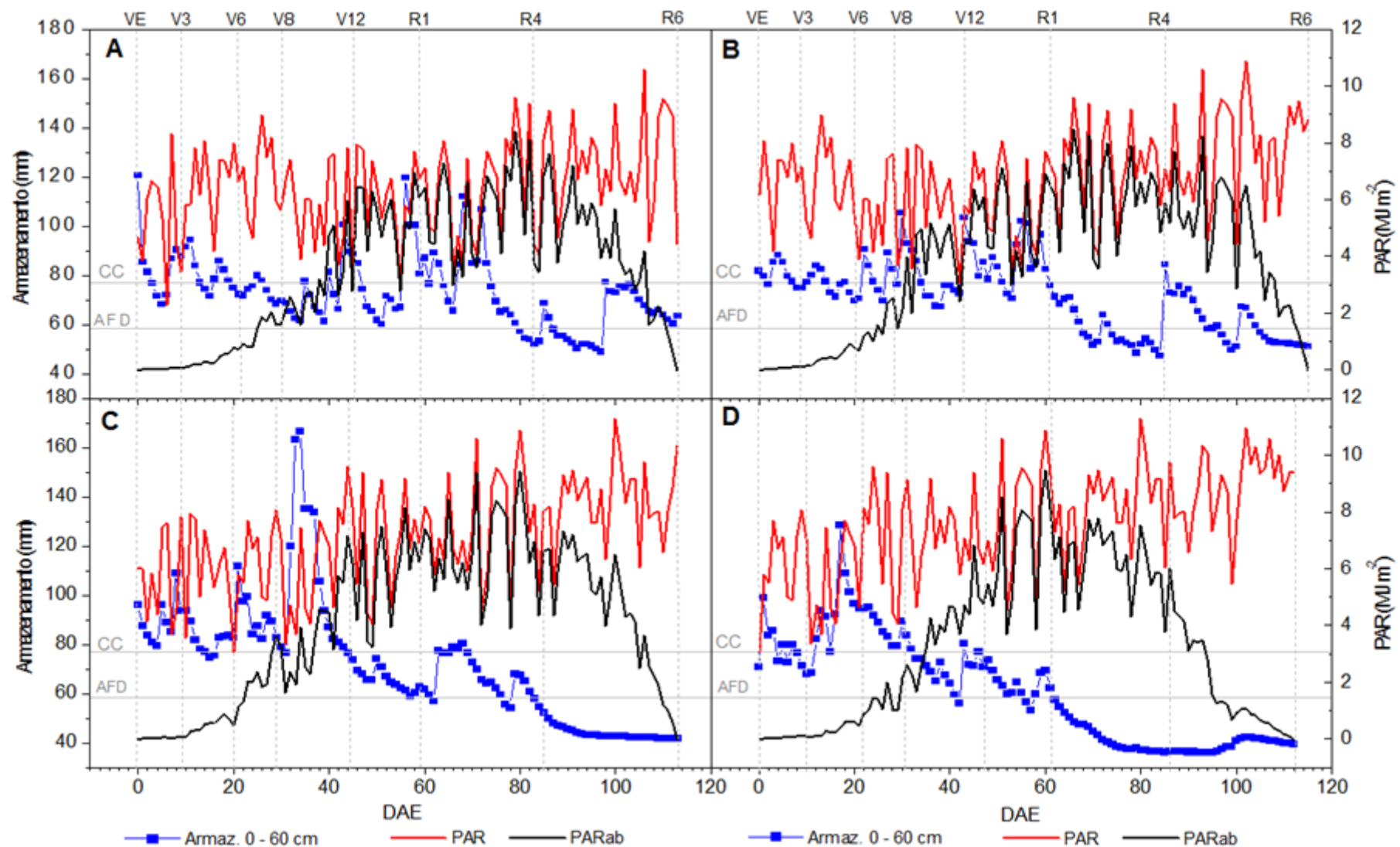


Figura 10. Armazenamento de água no solo (mm), RFA e RFA_{abs} (MJ m⁻²), em função dos dias após a emergência (DAE) para quatro épocas de semeadura de milho [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e T4 30/06/08 (D)].

No período compreendido entre o pendoamento (VT) e 15 dias após esta fase, verificou-se um comportamento muito variado, entre os tratamentos, no que concerne ao armazenamento de água no solo. Neste período, o tratamento T1 não apresentou valores de armazenamento de água no solo abaixo do limite da AFD. Verificou-se que nos tratamentos T2, T3 e T4, ocorreram 06 dias, 01 dia e 14 dias respectivamente, com o armazenamento de água no solo abaixo do limite da AFD. Para tratamento T4, além do período de déficit ter sido mais longo, correspondendo a 93% do período, os valores do armazenamento declinaram de forma contínua a partir do 62º DAE até o final do período crítico (Figura 10D). A partir do final do período crítico, até o estágio fenológico R4, o armazenamento de água no solo esteve abaixo do limite da AFD, durante todo o período para os tratamentos T2 e T4, enquanto para os tratamentos T1 e T3 o período de déficit foi menor, correspondendo a 44% e 42% do período, respectivamente.

4.3 Crescimento e desenvolvimento

O crescimento do milho é visto através do acúmulo da matéria seca, e o desenvolvimento através das mudanças dos estádios fenológicos. Essas mudanças de estádios ocorrem em função das condições ambientais, regidas principalmente, pela temperatura do ar, conceitualmente conhecida como unidades térmicas de desenvolvimento ou graus-dia (Tabela 8). O crescimento é definido pela habilidade com que a planta aproveita a radiação, a água e os nutrientes para a síntese e acúmulo de matéria seca.

Verifica-se uma variação na soma térmica e no período decorrido da semeadura até florescimento masculino (VT). Segundo Bonhomme *et al.* (1994), as unidades térmicas por si só não são suficientes para estimar o subperíodo da emergência da plântula à floração nas cultivares tropicais, pois além dos graus dia, o fotoperíodo, também afeta a duração deste subperíodo. De acordo com Warrington & Kanemasu (1983), o estudo do efeito da combinação entre temperatura e fotoperíodo é mais eficiente na avaliação do desenvolvimento da planta. Kiniry *et al.* (1983) observaram que o milho é sensível ao fotoperíodo no período de quatro a oito dias antes da iniciação da inflorescência masculina (VT).

Tabela 8. Intervalos em dias após a semeadura (DAS) e graus dia acumulados °C, (GDA) para cada fase fenológica de plantas de milho para as quatro épocas de plantio (T1, T2, T3 e T4).

FASE FENOLÓGICA	TRATAMENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	DAS/GDA	DAS/GDA	DAS/GDA	DAS/GDA
V3	09/192	09/192	09/178	10/184
V6	21/359	20/340	20/310	22/326
V8	30/480	28/441	29/420	31/436
V12	45/669	43/623	44/597	47/629
VT	58/827	59/815	58/770	60/893
R1	59/839	61/838	59/782	61/805
R4	83/1124	85/1130	85/1103	86/1142
R6	113/1493	115/1510	113/1494	112/1518

4.3.1 Matéria seca

A produção e o acúmulo de massa seca da parte aérea e a sua partição entre os componentes: colmos, folhas, folhas senescentes, espiga, brácteas, ráquis, pendão e grãos, foram determinados em oito fases fenológicas, para os quatro tratamentos. Na Figura 11, observa-se que para todos os tratamentos, até o estágio de oito folhas (V8), ocorrido entre 28 a 31 dias após a emergência (DAE), a cultura acumulou em torno de 8% a 10% da massa seca relativa ao estágio de grão farináceo duro (R5). É pouco, considerando-se que neste momento já foram transcorridos mais de 27% do total de dias do ciclo da cultura. Resultados semelhantes foram encontrados por Romano (2005) trabalhando com a cultura do milho no Estado de São Paulo. Isso pode ser decorrente do reduzido aparato fotossintético das plantas até esse estágio, contribuindo para um baixo acúmulo de matéria seca.

No estágio fenológico de 12 folhas (V12), ocorrido entre 42 a 47 DAE, a massa seca da parte aérea variou de 25,18% (T2), a 36,31% (T4). Neste estágio, as maiores contribuições para a massa seca, provem da massa de folhas e bainhas e variaram de 17,69% (T3) a 23% (T4), quando comparadas à massa seca total acumulada na estação de crescimento. Nessa fase, as estruturas florais masculinas e femininas, mesmo ainda não sendo emitidas, são facilmente identificáveis quando as plantas são dissecadas.

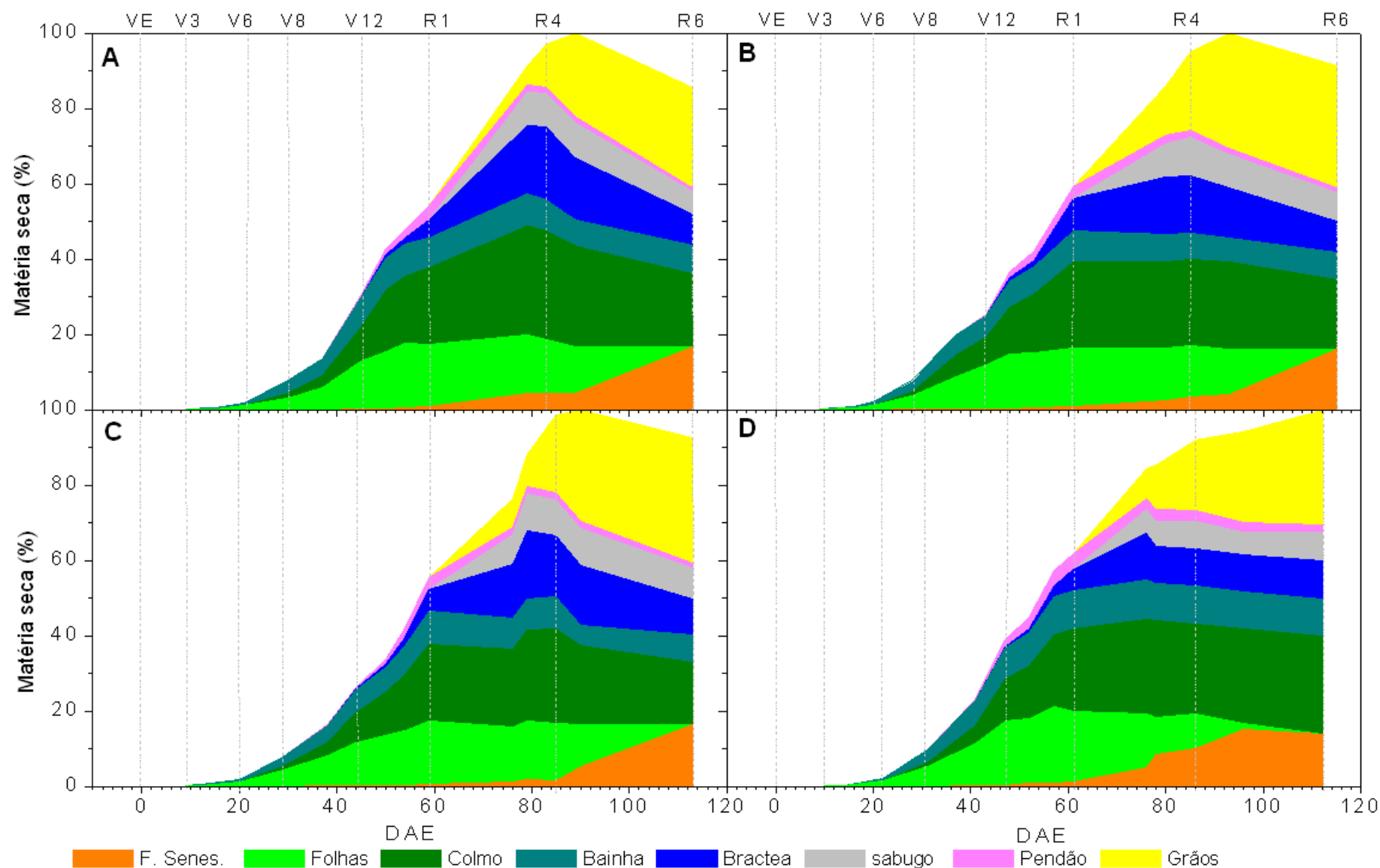


Figura 11. Matéria seca acumulada por partes da planta em % do total, em função dos estádios fenológicos (VE a R6) e dias após a emergência (DAE), para as quatro épocas de semeadura, [T1 06/05/08 (A), T2 19/05/08 (B), T3 10/06/08 (C) e T4 30/06/08 (D)].

A contribuição da massa seca dessas estruturas, nesse momento, não alcança 2% da massa total acumulada na estação de crescimento. No estágio fenológico R1, a planta acumulou cerca de 54% (T1) a 61% (T4) da sua matéria seca total. Na Tabela 9 pode-se observar a partição da matéria seca (g planta⁻¹) nesse estágio.

Tabela 9. Partição de massa seca (g planta⁻¹), de plantas de milho no estágio fenológico R1, para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).

PARTE DA PLANTA	TRATAMENTOS				DMS	CV%
	T1	T2	T3	T4		
Folhas verdes	39,30a ⁽¹⁾	38,47a	40,50a	35,13a	7,30	11,44
Folhas senescentes	1,64ab	1,65ab	0,99b	2,25a	0,86	31,54
Colmo	47,10ab	56,15a	48,83ab	41,46b	10,76	13,36
Bainha	19,07a	20,14a	21,63a	19,11a	4,06	12,21
Total	126,72ab	144,72a	133,31ab	116,49b	27,06	12,47

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey
DMS: Diferença mínima significativa
CV: Coeficiente de variação.

Verifica-se que a massa de folhas senescentes foi significativamente maior no tratamento T4 e, menor no tratamento T3. Os tratamentos T2 e T1 não diferiram. Não houve diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) na massa seca de folhas verdes. Como a massa de folhas verdes foi, nesse estágio, muito mais alta em relação à massa de folhas senescentes que correspondeu a 2,3% em T3 e 6% em T4, deduz-se que a pequena diferença entre a massa de folhas totais e folhas verdes, levou a resultados estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$), da massa seca das folhas senescentes.

O tratamento T4 apresentou valores de massa seca dos colmos significativamente mais baixos que nos demais tratamentos neste estágio fenológico, o que pode ter sido causado por uma menor habilidade da planta em armazenar fotoassimilados associada a uma menor produção de carboidratos decorrente do estresse hídrico (CRUZ *et al.*, 1996).

A massa seca das bainhas foliares não apresentou diferenças estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos. Essas estruturas não se constituem em órgãos de armazenamento de fotoassimilados. Na avaliação da massa seca total, observa-se que nesse estágio fenológico (R1) ocorreram variações significativas entre T4 e T2, enquanto T1 e T3 não diferiram entre os tratamentos.

Analisando o estágio fenológico R4, verifica-se que a massa seca de folhas verdes do tratamento T4 foi significativamente, mais baixa que nos demais tratamentos (Tabela 10). Isso pode ter sido decorrente do estresse hídrico ocorrido no período, dificultando a produção de fotossintatos e acelerando o processo de senescência foliar. A massa seca acumulada no colmo nesse tratamento foi estatisticamente inferior ao tratamento T1.

Tabela 10. Partição de massa seca (g planta⁻¹), de plantas de milho no estágio fenológico R4, para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).

PARTE DA PLANTA	TRATAMENTOS				DMS	CV
	T1	T2	T3	T4		
Folhas senescentes	10,21b ⁽¹⁾	8,20ab	3,56c	24,94a	5,76	29,53
Folhas verdes	33,81a	33,56a	36,97a	17,40b	6,63	13,09
Colmo	67,86a	55,84ab	60,35ab	45,08b	17,92	18,80
Bainha	18,74a	16,77a	20,24a	18,94a	4,63	14,90
Espiga	93,32ab	113,08a	112,23a	68,01b	29,16	18,13
Total	227,85ab	232,16a	237,45a	179,52b	49,96	13,69

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey
DMS: Diferença mínima significativa
CV: Coeficiente de variação.

Analisando a massa seca das espigas, verifica-se que o tratamento T4, continua apresentando menor acúmulo de matéria seca, quando comparado aos demais tratamentos. Quanto à matéria seca total, neste estágio fenológico, os valores correspondentes ao tratamento T4 apresentaram diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) entre os demais tratamentos. A menor massa das espigas pode estar relacionada à senescência prematura das folhas e ao enrolamento das mesmas associadas a redução da produção de fotoassimilados pelas plantas, além de mudanças ocorridas na partição e translocação, em decorrência da deficiência hídrica, ocorrida no período da floração (FERREIRA *et al.*, 2000).

4.3.2 Índice de Área Foliar

A área foliar, que constitui o aparato de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, tem grande relevância na síntese e acúmulo de matéria seca pelos vegetais. A Figura 12 mostra a evolução do IAF do milho para as quatro épocas de semeadura avaliadas, correspondentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4.

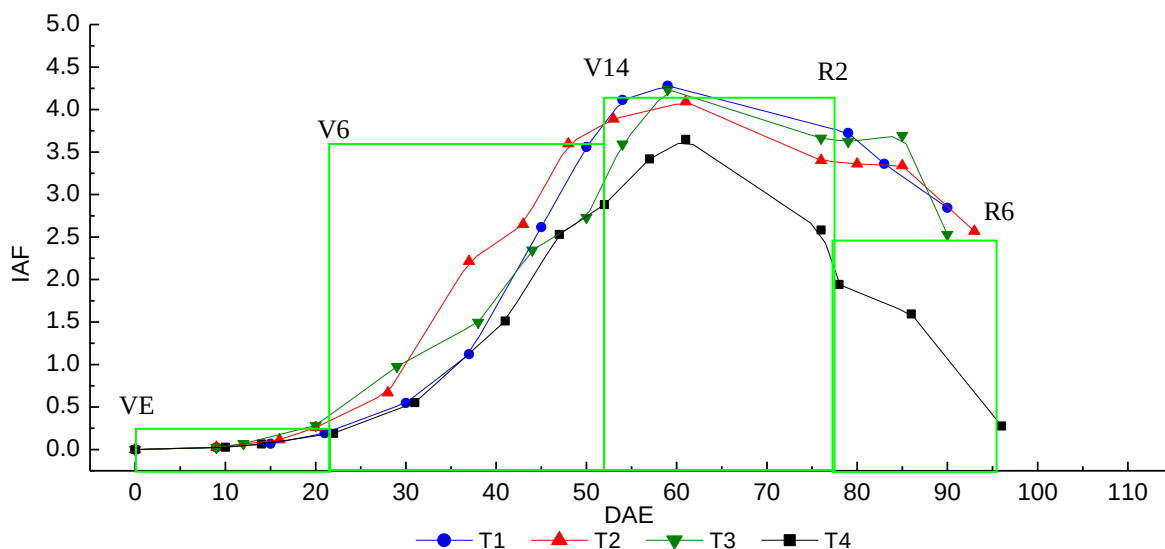


Figura 12. Índice de área foliar (IAF) nos estádios fenológicos VE, V6, V14, R2 e R6 de plantas de milho para quatro épocas de semeadura, (T1, T2, T3 e T4) em função dos dias após a emergência (DAE)

A configuração do crescimento do IAF seguiu o padrão característico para plantas anuais, em particular o milho, onde se verifica um período de expansão lenta da emergência até o estágio fenológico de 6 folhas (V6), ocorrido entre 20 e 22 DAE, tendo posteriormente um período de rápida expansão entre o estágio de 6 folhas a 14 folhas, ocorrido entre 48 e 52 DAE. A fase seguinte foi caracterizada por um período de pequena variação do crescimento, compreendendo o período de 14 folhas até o estágio de grão leitoso ocorrido entre 73 e 76 DAE. A fase final é caracterizada pelo decréscimo do IAF, com a senescência das folhas, até o completo ciclo da cultura.

Os valores de IAF foram submetidos à análise de variância e avaliadas pelo teste de Tukey para 6 estádios fenológicos (Tabela 11). Os maiores valores de IAF ocorreram no estágio R1 (florescimento) em todos os tratamentos, tendo o tratamento T1 apresentado o valor mais alto e o tratamento T4 o valor mais baixo, porém não houve diferença significativa entre os tratamentos, nesse estágio, indicando que as variações nos fatores ambientais não foram suficientes para influenciar o desenvolvimento do IAF.

O estágio fenológico V3 não mostrou diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) para as quatro épocas de semeadura. Isto seria decorrente do fato de que neste estágio as plantas estão na dependência das reservas das sementes e trata-se de um mesmo genótipo e um mesmo padrão de sementes, em termos de tamanho e massa. Os estádios fenológicos V6 e

V8 mostram que o tratamento T3 apresentou maior IAF, mesmo não diferindo estatisticamente do tratamento T2 no estágio V6 que apresentou caráter ambíguo.

Tabela 11. Médias de IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) de plantas de milho para os estádios fenológicos de três folhas (V3), seis folhas (V6), oito folhas (V8), 12 folhas (V12), antese (R1) e grãos farináceos (R4), para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).

ESTÁDIO FENOLÓGICO	T1	T2	T3	T4	DMS	CV (%)
	IAF					
V3	0,025a ⁽¹⁾	0,027a	0,022a	0,027a	0,008	18,95
V6	0,193b	0,259ab	0,283a	0,191b	0,070	18,19
V8	0,548b	0,668b	0,976a	0,553b	0,134	11,69
V12	2,616a	2,648a	2,346a	2,531a	0,465	11,01
R1	4,280a	4,091a	4,237a	3,649a	0,739	10,92
R4	3,362a	3,339a	3,695a	1,596b	0,711	14,24

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey
DMS: Diferença mínima significativa
CV: Coeficiente de variação.

Nos estádios fenológicos V12 e R1 não ocorreram diferenças, estatisticamente significativas, entre os tratamentos. Até esse estágio fenológico, todos os tratamentos apresentaram dosséis com características semelhantes. A partir do florescimento, já com o número máximo de folhas definidas, nota-se uma progressiva redução do IAF e, no estágio R4, verifica-se uma diminuição significativa no IAF do tratamento T4. Isso decorreu da senescência natural das folhas, agravada pelo déficit hídrico ocorrido no período.

4.3.3 Área Foliar específica

A área foliar específica (AFE) é uma característica da espécie a qual sofre modificações em função das condições ambientais e da idade da planta. Os valores da AFE e da radiação solar fotossinteticamente ativa acumulada (PAR), por fase fenológica, encontram-se na Tabela 12. Pode-se verificar que nos estádios fenológicos V8, V12, R1 e R4, os menores valores de AFE corresponderam aos maiores valores da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), entretanto apenas nos estádios V8 e V12 esses valores da AFE apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre as épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4). No estágio fenológico V6, a menor RFA ocorreu na terceira época de semeadura e

correspondeu a maior AFE, porém a maior RFA, ocorrida na segunda época de semeadura (T2), não tenha correspondido a menor AFE. O tratamento T1 apresentou a menor AFE, mesmo não tendo ocorrido diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) entre a AFE de T1 e T2. Nos estádios fenológicos R1 e R4, as variações nos valores de RFA não produziram diferenças estatisticamente significativas nos valores da AFE, mesmo tendo ocorrido uma tendência de decréscimo nesses valores a medida que a RFA cresceu.

Tabela 12. Médias de área foliar específica (AFE) de plantas de milho para os estádios fenológicos de três folhas (V3), seis folhas (V6), oito folhas (V8), 12 folhas (V12), antese (R1) e grão farináceo (R4) e radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA) acumulada para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).

ESTÁDIO FENOLÓGICO	AFE ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)						RFA (MJ m^{-2})			
	T1	T2	T3	T4	DMS	CV	T1	T2	T3	T4
V3	381,38a ⁽¹⁾	395,21a	441,60a	406,10a	60,97	9,02	51,54	68,05	57,61	68,10
V6	306,11b	316,50ab	339,00a	308,83b	27,65	5,25	131,93	141,37	122,27	136,70
V8	263,00a	272,00a	242,00ab	228,17b	30,13	7,20	192,83	186,73	180,21	202,76
V12	215,12ab	208,43ab	217,22a	193,38b	22,20	6,39	277,50	276,33	273,05	316,23
R1	199,14a	194,45a	191,07a	190,51a	15,85	4,91	364,25	381,51	377,96	428,35
R4	182,93a	181,04a	182,03a	166,91a	16,85	5,63	516,88	552,13	576,33	634,80

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey
DMS: Diferença mínima significativa
CV: Coeficiente de variação.

No início do desenvolvimento, os valores da AFE podem ser maiores, revelando folhas pouco espessas, com pouca massa seca. Com o desenvolvimento da planta, aumenta-se a área foliar e a massa seca das folhas, tendendo à queda dos valores dessa variável. A área foliar é um componente morfofisiológico e a massa um componente anatômico de uma espécie vegetal, pois está relacionado à composição interna (número e tamanho) das células do mesofilo. A partir disso, infere-se que o inverso da AFE reflete a espessura das folhas (BENINCASA, 2003). Estudos desenvolvidos por Ferreira (1996) relatam que decréscimos na AFE indicam aumento na espessura da folha resultante do aumento e do tamanho do número de células nas plantas. Os maiores valores de AFE em todas as épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4) foram observados no início do desenvolvimento das plantas (Figura 13), corroborando com estudos realizados por Benincasa (2003), que verificou que os valores da AFE, no início do desenvolvimento, podem ser maiores, revelando folhas pouco espessas, com pouca massa seca e área foliar.

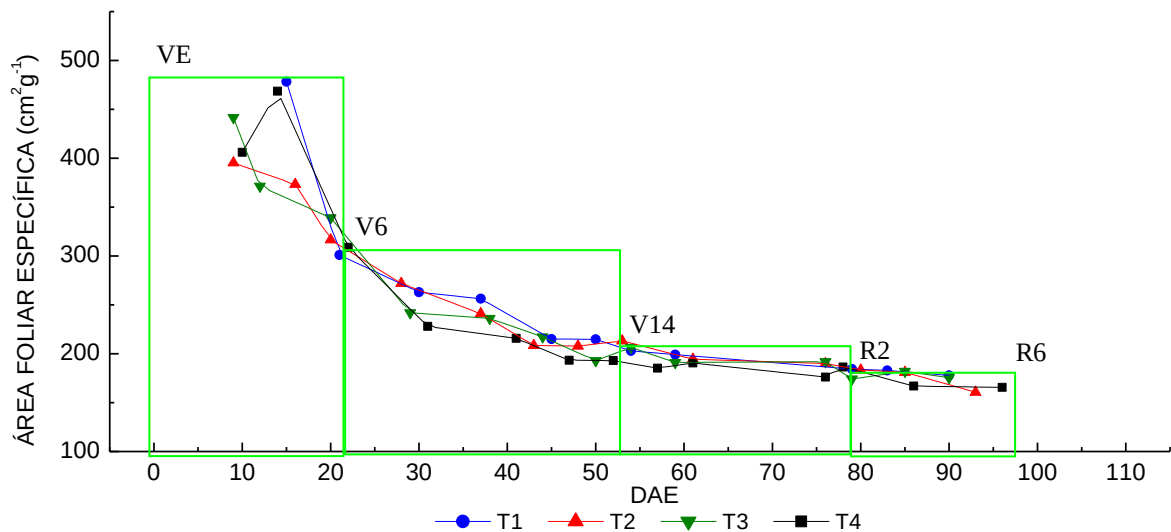


Figura 13. Área foliar específica ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) do milho para quatro épocas de semeadura correspondentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4.

Os valores encontrados para AFE concordam também com aqueles verificados em estudos conduzidos por Romano (2005), com a cultura do milho em São Paulo estando estes, próximos daqueles verificados por Danalatos *et al.* (1994), em trabalho conduzido sob clima mediterrâneo. Verifica-se ainda que o menor valor da AFE observada correspondeu à maior RFA, confirmando a tendência de aumento da espessura da folha com o aumento da RFA. A tendência de decréscimo dos valores de AFE, (Figura 13) denota que à medida que a planta se desenvolve a espessura de folha tende a aumentar.

4.3.4 Taxa de crescimento da cultura

Os valores da taxa de crescimento da cultura (Tabela 13) tiveram variações semelhantes entre os estádios fenológicos V8 e V12, para todos os tratamentos, denotando que as variações ambientais não foram suficientes para afetar o crescimento e acúmulo de matéria seca total, nos quatro tratamentos. No estágio fenológico R4, ocorreu significativa diferença na taxa de crescimento da cultura (TCC) para o tratamento T4, em relação aos demais tratamentos. Em R1 verificou-se diferença estatisticamente significativa apenas entre T4 e T2. Isso pode ter sido decorrente dos efeitos do déficit hídrico mais intenso verificado a partir de R1, para quarta época de semeadura (T4).

Tabela 13. Taxa de crescimento da cultura (TCC) em g m⁻² dia⁻¹ em seis estádios fenológicos de plantas de milho em quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).

ESTÁDIOS FENOLÓGICOS	TRATAMENTOS				DMS	CV%
	T1	T2	T3	T4		
V3	0,119b ⁽¹⁾	0,177a	0,164a	0,187a	0,04	16,54
V6	1,150ab	1,511a	1,176ab	1,007b	0,43	21,24
V8	3,333a	3,690a	3,594a	3,296a	1,08	18,69
V12	8,682a	7,873a	7,913a	8,562a	1,88	13,70
R1	11,813ab	13,062a	12,427ab	10,504b	2,46	12,35
R4	15,099a	15,022a	15,365a	11,078b	3,31	14,07

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey
DMS: Diferença mínima significativa
CV: Coeficiente de variação.

Mesmo com o aumento da RFA, as plantas não conseguiram um bom aproveitamento da energia disponível no ambiente. Isso pode ter sido decorrente do estresse hídrico, ocorrido a partir do estágio fenológico R1. Quando as épocas de semeadura tornaram-se mais tardias, a disponibilidade de PAR foi maior, porém a redução gradativa das precipitações pluviais levou ao déficit hídrico e conseqüentemente estresse nas plantas, comprometendo a taxa de crescimento da cultura como ocorreu no tratamento T4.

4.4 Eficiência no uso da água

A eficiência no uso da água é um parâmetro que relaciona a massa seca e a quantidade de água necessária para produzi-la. Observando a Tabela 14, verifica-se que os valores da eficiência no uso da água não apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre as épocas de semeadura para os estádios fenológicos V3, V6, V8 e V12. Isso pode ter sido decorrente do suprimento hídrico adequado ao desenvolvimento das plantas em todos os tratamentos. Observa-se que no florescimento feminino R1, ocorreram diferenças estatisticamente significativas entre as épocas de semeadura T3 e T4 decorrentes da redução na evapotranspiração com comprometimento da eficiência no uso da água em T4. Mesmo nesse tratamento, que sofreu forte estresse hídrico nos estádios seguintes, houve redução tanto na produção de massa seca como na evapotranspiração e com isso a planta fechou os estômatos economizando água em detrimento da fixação de CO₂.

Tabela 14. Eficiência no uso da água (kg m^{-3}) para plantas de milho em seis estádios fenológicos (V3, V6, V8, V12, R1, R4 e R5) para as quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).

ESTÁDIOS FENOLÓGICOS	TRATAMENTOS				DMS	CV%
	T1	T2	T3	T4		
V3	0,038a	0,049a	0,056a	0,056a	0,023	27,74
V6	0,355a	0,466a	0,436a	0,348a	0,144	21,63
V8	0,997a	1,174a	1,246a	1,199a	0,359	18,69
V12	2,747a	2,535a	2,705a	2,963a	0,616	13,53
R1	3,690ab	4,175ab	4,335a	3,450b	0,805	12,36
R4	4,785a	4,916a	5,229a	4,836a	1,148	13,96
R5	4,623a	4,638a	5,204a	4,703a	1,385	17,37

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey
DMS: Diferença mínima significativa
CV: Coeficiente de variação.

A Figura 14 mostra os valores das declividades das retas das regressões lineares que relacionam a produção de matéria seca com quantidade de água, necessária para a sua produção. Esses valores variaram de $3,76 \text{ kg m}^{-3}$ no tratamento T4 a $4,28 \text{ kg m}^{-3}$ no tratamento T3. Entretanto, quando se observa a eficiência no uso da água para rendimento econômico, EUA_r , Tabela 15, verifica-se que os valores variaram de $0,86 \text{ kg m}^{-3}$ a $1,71 \text{ kg m}^{-3}$. Esses valores estão abaixo daqueles encontrados por Kang *et al.* (2000), trabalhando com milho na região semi-árida do noroeste da China, que variam de 2,11 a $2,38 \text{ kg m}^{-3}$ e, estiveram próximos dos encontrados por Silva (2007) em São Paulo, que encontrou valores variando de $0,63 \text{ kg m}^{-3}$ a $1,31 \text{ kg m}^{-3}$, trabalhado com a cultura do milho, sob várias doses de nitrogênio.

Enquanto houve uma redução de apenas 12% entre T4 e T3 quanto à eficiência no uso da água para a matéria seca total, a diferença entre os dois tratamentos para a eficiência no uso da água para o rendimento econômico foi de 50%, tendo apresentado diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) quando comparado às demais épocas de semeadura. Isso é uma indicação de que o déficit hídrico ocorrido no período de enchimento dos grãos em T4 reduziu significativamente o rendimento da cultura em relação às demais épocas de semeadura.

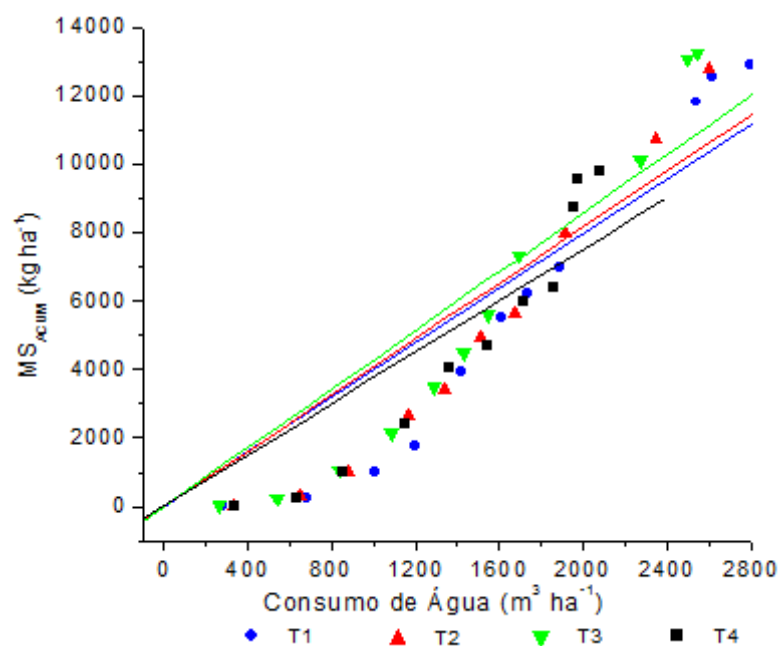


Figura 14. Relação entre a produção de massa seca acumulada total (MS, kg ha⁻¹), e o consumo de água (m³ ha⁻¹), do milho semeado em quatro épocas: tratamento T1 (y = 3,98x, r² = 0,95), tratamento T2 (y = 4,09x, r² = 0,97), tratamento T3 (y = 4,28x, r² = 0,96), tratamento T4 (y = 3,76x, r² = 0,93), na região de Arapiraca-AL

Tabela 15. Evapotranspiração real (mm), consumo de água (m³ ha⁻¹), rendimento de grãos (kg ha⁻¹), eficiência no uso da água, EUA, (kg m⁻³) para a matéria seca total e eficiência no uso da água (kg m⁻³) para o rendimento EUA_r, de plantas de milho submetidas a quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).

PARÂMETROS	T1	T2	T3	T4
Evapotranspiração real	356,2	335,3	262,2	229,6
Consumo de água	3562	3353	2622	2296
Rendimento de grãos	3780a	4119a	4497a	1968b
EUA (matéria seca total)	3,98	4,09	4,28	3,76
EUA _r (rendimento de grãos)	1,06bc	1,23b	1,71a	0,86c

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey
DMS: Diferença mínima significativa
CV: Coeficiente de variação.

A maior EUAr observada em T3 foi decorrente da redução da disponibilidade de água após o período crítico não afetando o rendimento da cultura que não apresentou diferenças

estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$) quando as épocas de semeadura T1, T2 e T3 foram comparadas. As estratégias de adaptação das plantas de milho ao estresse hídrico segundo Pandey *et al.* (2000) passam pela redução do IAF, aumento do sistema radicular, diminuição da relação copa/raiz e aumento da EUA.

4.5 Eficiência no uso da Radiação

A eficiência no uso da radiação (EUR) é um indicador da habilidade com que o dossel do vegetal absorve e utiliza a radiação para a síntese de matéria seca. No caso do milho, que é uma planta C4, o uso da radiação é elevado, mesmo sob condições de temperaturas elevadas, nas quais a ribulose-1,5-bifosfato carboxilase oxigenase não é tão eficiente quanto a fosfoenolpiruvato carboxilase, na captura do CO₂.

Os valores de RFA_{abs}, obtidos ao longo do ciclo do milho, dos estádios fenológicos de 3 folhas (V3) até o estágio de grãos farináceos duros (R5), para as quatro épocas de semeadura foram plotados em gráfico, tomando a massa seca acumulada como variável dependente e a RFA_{abs} como variável independente. As retas das regressões lineares para as quatro épocas de semeadura e a inclinação da reta que corresponde ao valor da EUR, para cada tratamento são apresentadas na Figura 15. Verifica-se que ao final do ciclo, há uma tendência de redução na linearidade da relação entre a massa seca e a RFA_{abs}, em função da senescência de grande parte do dossel das plantas.

O tratamento T1, correspondente a primeira época de semeadura, apresentou uma EUR de 4,61 g de massa seca por MJ m⁻² de RFA_{abs}, enquanto o tratamento T4, contabilizou apenas 2,98 g de massa seca por MJ m⁻² de RFA_{abs}, sendo 35,4 % menor que T1. Essas duas épocas de plantios tiveram RFA para todo o ciclo (Tabela 17) da ordem de 734,15 MJ m⁻² e 865,85 MJ m⁻², respectivamente. Portanto, o tratamento T4, contou com uma disponibilidade de energia 18% maior que o tratamento T1.

A Tabela 16 mostra os valores da EUR, para os estádios fenológicos de 3 folhas (V3) até a maturidade fisiológica (R5). Observa-se, mais uma vez, que, no tratamento T4, os valores da EUR sofrem maior depleção, a partir da antese (R1) apresentando diferenças estatisticamente significativas entre as épocas de semeadura para os estádios fenológicos R1, R4 e R5. Essa menor EUR, observada em T4, está relacionada com o menor desenvolvimento do dossel e, por consequência do IAF (Kunz *et al.*, 2007), assim como, pelo desenvolvimento de mecanismos morfológicos e fisiológicos de defesa da planta ao estresse hídrico como o enrolamento e a senescência mais precoce das folhas, principalmente, a partir da antese (R1).

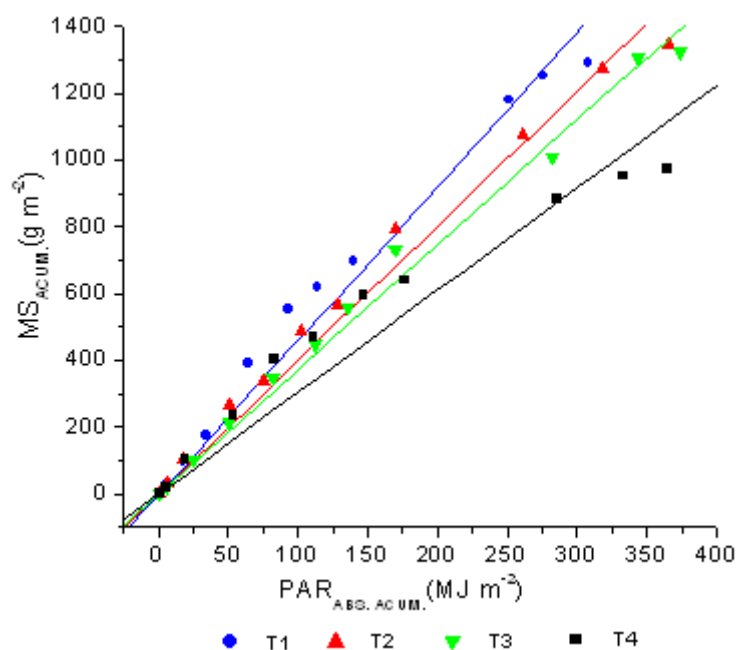


Figura 15. Relação entre a produção de massa seca acumulada total (MS, g m⁻²) do milho e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (RFA_{abs}, MJ m⁻²), semeado em quatro épocas: tratamento T1 ($y = 4,61x$, $r^2 = 0,99$), tratamento T2 ($y = 4,03x$, $r^2 = 0,99$), tratamento T3 ($y = 3,74x$, $r^2 = 0,99$), tratamento T4 ($y = 2,98x$, $r^2 = 0,98$), na região de Arapiraca-AL.

Tabela 16. Eficiência no uso da radiação (g MS MJ⁻¹ m⁻²) para plantas de milho em quatro épocas de semeadura para sete estádios fenológicos (V3 a R5).

ESTÁDIO FENOLÓGICO	TRATAMENTOS				DMS	CV%
	T1	T2	T3	T4		
V3	2,83a ⁽¹⁾	2,78a	3,71a	3,15a	1,336	25,75
V6	4,85a	5,21a	4,04a	4,21a	1,560	20,48
V8	5,61ab	5,84a	4,16b	5,37ab	1,584	18,14
V12	6,10a	4,52b	4,26b	4,85b	1,121	13,65
R1	4,99a	4,70a	4,33ab	3,63b	0,878	11,96
R4	4,55a	4,02a	3,80a	2,86b	0,934	14,57
R5	4,20a	3,68a	3,54ab	2,67b	0,985	16,81

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey
DMS: Diferença mínima significativa
CV: Coeficiente de variação.

O valor da EUR obtido para o tratamento T1 foi de 4,61 g MJ⁻¹ de matéria seca e mostrou-se mais alto que aqueles encontrados em outras pesquisas com milho (KINIRY *et al.*, 1989), onde este fator variou de 3,0 a 4,2 g MJ⁻¹ m⁻² de matéria seca, entretanto nos demais tratamentos os valores da EUR apresentaram coerência com os encontrados por aqueles

pesquisadores. Pesquisas desenvolvidas durante cinco anos por Lindquist *et al.* (2005), em latitudes superiores a 40° N. registraram resultados de RFA acumulada, da emergência até a antese, de 719,4 MJ m⁻² e uma EUR média de 3,74 g MJ⁻¹ de matéria seca, bem diferente dos valores da RFA obtidos nesse experimento, para o mesmo período de crescimento, que variaram de 364,25 MJ m⁻² a 428,35 MJ m⁻² (Tabela 16), sendo 49,40% e 40,46% menores respectivamente, quando comparados aos valores encontrados por aqueles pesquisadores.

A eficiência no uso da radiação para o rendimento econômico (EUR_r), apresentou valores de 0,953, 0,922, 0,963 e 0,523 g de grãos MJ⁻¹ para os tratamentos T1, T2, T3 e T4 respectivamente.

Tabela 17. Radiação solar fotossinteticamente ativa, RFA, (MJ m⁻²) para os estádios fonológicos R1 (antese) e para todo o período de crescimento (R6) para quatro épocas de semeadura de milho (T1, T2, T3 e T4).

FASE FENOLÓGICA	TRATAMENTOS			
	T1	T2	T3	T4
R1	364,25	381,51	377,96	428,35
R6	734,15	787,23	811,54	865,85

4.6 Produtividade e atributos da produção

Quando as quatro épocas de semeadura são avaliadas, sob o ponto de vista da produção e seus atributos, verifica-se que a componente altura das plantas não apresentou diferenças estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$), o mesmo ocorrendo com o número de fileiras de grãos por espiga (Tabela 18). Isso decorre do fato da altura da planta ser definida na emissão do pendão, com a abertura da última folha, e o número potencial de óvulos (grãos) por espiga ser determinado quando as plantas atingem 10 (V10) a 12 folhas (V12) com a lígula visível (RODRIGUES & DIDONET, 2003). Nesse momento, muito antes do espigamento, não ocorreram déficits hídricos significativos para as quatro épocas de semeadura. Analisando o tratamento T4, verifica-se que o tamanho dos grãos e sua massa foram fortemente afetados pelo déficit hídrico, que se agravou durante o período de enchimento dos grãos. O déficit hídrico, ocorrido no período do pendoamento (VT) até o enchimento dos grãos, promoveu um significativo número de espigas sem grãos ou com poucos grãos.

O número de espigas por planta e o número de grãos por espiga são definidos no período crítico da cultura e, portanto, sofreram efeitos mais intensos do déficit hídrico no tratamento T4. De acordo com Herrero & Johnson (1981), o déficit hídrico afeta, principalmente, o desenvolvimento dos órgãos florais masculinos, bem como a germinação do pólen.

Tabela 18. Médias dos atributos da produção e das características das plantas de milho para a quatro épocas de semeadura (T1, T2, T3 e T4).

ATRIBUTOS DA PRODUÇÃO	TRATAMENTOS				DMS	CV%
	T1	T2	T3	T4		
Altura das plantas (cm)	250,36a ⁽¹⁾	250,55a	239,12a	239,57a	13,38	3,28
Número de espigas por planta	1,03a	1,01a	1,03a	0,85b	0,09	5,64
Comprimento das espigas (cm)	12,93a	13,88a	13,48a	10,64b	1,70	8,02
Diâmetro da espiga (cm)	4,46a	4,63a	4,53a	3,90b	0,27	3,75
Número de fileiras de grãos	12,76a	12,81a	14,05a	13,29a	1,48	6,72
Massa dos grãos (g grão ⁻¹)	0,230a	0,247a	0,237a	0,193b	0,02	5,36
Número de grãos por espiga	313a	350a	335a	184b	73,92	15,04
Produção (kg ha ⁻¹)	3780a	4119a	4497a	1968b	823,45	13,78

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey
DMS: Diferença mínima significativa
CV: Coeficiente de variação.

Trabalhos desenvolvidos por Schussler & Westgate (1991), sugerem que a redução do número de grãos por espiga se deve à baixa taxa de suprimento de assimilados aos ovários, provocando abortamento, em decorrência do déficit hídrico. O tamanho dos grãos foi significativamente afetado no tratamento T4, por depender da condição hídrica durante o período de enchimento de grãos, o qual foi caracterizado por intenso déficit.

O tamanho e o diâmetro das espigas, também estão relacionados ao enchimento e tamanho dos grãos. Plantas submetidas ao déficit hídrico do pendoamento ao início de enchimento de grãos apresentam grande número de espigas sem grãos ou espigas com poucos grãos. Isso se deve ao fato de que no tratamento T4, as plantas emitiram a inflorescência masculina no momento em que se iniciou o déficit hídrico, 60 dias após semeadura.

Isso pode ter quebrado o sincronismo entre a emissão dos estigmas e liberação do pólen, justificando a ocorrência de espigas com poucos grãos ou sem grãos (BERGAMASCHI *et al.*, 2004).

A redução do número de espigas também pode ser atribuída ao atraso na emissão da mesma, provocado pelo déficit hídrico que levou as plantas a perderem sua capacidade de emissão de espigas por causa do estado debilitado em que se encontravam decorrente da restrição hídrica. Tal evidência está de acordo com Guei & Wasson (1992), que constataram influência do estresse por água e temperatura nas datas de florescimento masculino e feminino e na duração do intervalo entre antese e emissão de estigmas em milho.

A análise desse conjunto de dados revela a alta sensibilidade do milho, ao estresse hídrico, na fase do florescimento o enchimento dos grãos, causando significativa depleção na produção e produtividade do tratamento T4, que correspondeu a apenas 43,7% da produtividade do tratamento T3.

5 CONCLUSÕES

As análises das interações entre as variáveis agrometeorológicas com o crescimento, desenvolvimento e produtividade do milho, indicaram que o índice de área foliar, a taxa de crescimento da cultura, a área foliar específica e o acúmulo de matéria seca não apresentaram diferenças significativas até o florescimento, nos quatro tratamentos, indicando que as variações ambientais não se constituíram em limitações para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Não houve diferenças entre os tratamentos nas componentes, altura da plantas e número de fileiras de grãos por espiga, indicando que as condições ambientais foram adequadas para a expressão desses atributos.

A depleção no armazenamento de água do solo, abaixo da água facilmente disponível, ocorrido no período de enchimento de grãos na quarta época de semeadura, provocou reduções no número de espigas por planta, no comprimento e diâmetro das espigas, na massa de grãos, no número de grãos por espiga e no rendimento da cultura. A evapotranspiração real acumulada durante a estação de crescimento (nos quatro tratamentos) foi decrescente, apresentando menor valor para a última data de semeadura, indicando que mesmo havendo uma maior quantidade de energia solar disponível no ambiente, a planta não conseguiu acumular matéria seca em função da redução do conteúdo de água no solo.

Os valores da eficiência no uso da radiação estiveram de acordo com a maioria das pesquisas realizadas, porém, a radiação fotossinteticamente ativa acumulada até o florescimento, ficou em torno da metade daquelas medidas radiativas em regiões do mundo com altas produtividades. As produtividades obtidas nas quatro épocas de semeadura mostraram padrões variáveis com o regime hídrico, mas ficaram em torno da metade do potencial produtivo da variedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. A.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. Roma: FAO, 1998. 328p. (Irrigation and drainage paper, 56).

BASSOY, L. H.; FANTE JUNIOR, L.; JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estruturada latossólica: II Comparação entre cultura irrigada e não irrigada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, p 541-548, 1994.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2ª ed. Jaboticabal: ed. Funep, 2003, 42 p.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MULLER, A., G.; COMIRAN, F.; MACHADO, B. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v. 39, p. 831-839, 2004.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. New York: Springer Verlag, 1979, 189 p.

BONHOMME, R.; DERIEUX, M.; EDMAEADS, G.O. Flowering of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multilocation field trials. **Crop Science**, Madison, v. 34, p. 156-164, 1994

BONHOMME, R. RUGET, F. DERIEUX, M. VINCOURT, P. Relations entre production de matière sèche aérienne et énergie interceptée chez différents génotypes de maïs. **C. R. Acad. Sc.**, Paris, v. 294, p. 393-398, 1982.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. **CS616 and CS625 Water Content Reflectometers – instruction manual**, Logan: CAMPBELL, 2004, 42 p.

CAMPBELL, G., S.; DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F.R.; JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dryland tropics**. Parancheru, India: Icrisat, 1988, p.15-26.

CARVALHO, H. W. L.; CARDOSO, M. J.; OLIVEIRA, I. R.; PACHECO, C., A. P.; GUIMARÃES, P. E. O.; LIRA, M. A.; TABOSA, J., N.; CAVALCANTI, M. H. B.; AMIN, S. M. F.; NASCIMENTO, M. M. A.; BRITO, A. R. M. B.; TAVARES, J. A.; FILHO, J. J. T.; OLIVEIRA, V. D.; RIBEIRO, S. S.; FEITOSA, L. F.; MELO, K. E. **Recomendações de cultivares de milho para o Nordeste brasileiro: ensaios realizados no ano agrícola de 2005/2006**. Aracaju, p. 8, 2006. (comunicado técnico / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1677-5635, 68)

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

CIRILO, A. G.; ANDRADE, F. H. Sowing date maize productivity: crop growth and dry matter partitioning. **Crop Science**, Madison, v. 34, p. 1039-1043, 1994.

COELHO, E. F.; SOUZA, C. F. Uso da reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação da umidade do solo e condutividade elétrica do solo. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS DAS PLANTAS, 2007, Cruz das Almas. **Anais do workshop sobre sistemas de aquisição e armazenamento de dados para avaliação das relações hídricas das plantas**. Cruz das Almas: EMBRAPA, 2007. 1 CD-ROM.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; FILHO, M. A. C.; LEDO, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 23-30, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB - (Brasília, DF). **Safra 2008/2009**, Disponível em: < www.conab.gov.br > Acesso em: 14 de abril de 2009.

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** - 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 1996, 204p.

CRUZ, A. C. R.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L.A.; ROCHA, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 1-10, 2005.

CUENCA, M. A. G; NAZÁRIO, C. N.; MANDARINO, D. C. **Características e Evolução da Cultura do Milho no Estado de Alagoas entre 1990 e 2003**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2005. p. 31, (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros)

DANALATOS, N. G.; KOSMAS, C. S.; DRIESSEN, P. M.; YASSOGLOU, N. The change in the specific leaf area of maize grown under Mediterranean conditions. **Agronomie**, Paris, v. 14, p. 433-443, 1994.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. M. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: FAO/UFPB, 1994, 218p.

DURÃES, F. O. M. **Limitações fisiológicas do milho nas condições de plantio nas regiões tropicais baixas**. 2007. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2007_1/limitemilho/index.htm>. Acesso em: 08/06/2009

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed. Brasília: Embrapa Produção e Informação, 1997, 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo**. Brasília: Embrapa Produção e Informação, 1999, 412 p.

FANCELLI, A. L. & DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 4ª ed. Piracicaba: Livrocere, 2004, 360 p.

FANTE JÚNIOR, L.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estruturada latossólica: I. comparação de metodologias. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, p. 513-518, 1994.

FERRÉ, P. A.; HENRIK H.; NISSEN, H. H.; SIMUNEK, J. The Effect of the Spatial Sensitivity of TDR on Inferring Soil Hydraulic Properties from Water Content Measurements Made during the Advance of a Wetting Front; **Vadose Zone Journal**, Madison, v.1, p. 281--288, 2002.

FERREIRA, E. **Ajustamento osmótico e análise de crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.), em função do nível de potássio e estresse hídrico**. Botucatu, 1996, 121f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

FERREIRA, V. M.; MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Produtividade de genótipos de milho (*Zea mays* L.) sob manejo diferenciado de irrigação e adubação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, p. 663-670, 2000.

FERREIRA JUNIOR, R. A. **Crescimento, produtividade e eficiência do uso da radiação no milho sob diferentes coberturas de solo**. Rio Largo, 2007. 26 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: FUNEP, 2007. 576 p.

FREITAS, L. F; RESENDE, R.; MANTOVANI, E. C.; FRIZZONE, J. A. Função de produção da cultura do milho e do feijão para diferentes lâminas e uniformidade de aplicação de água. **Acta Scientiarum Agronomia**, Maringá, v. 26, p. 503-511, 2004.

GILMORE, E. & ROGERS, J. S. Heat units in a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Stanford, V. 50, p. 611 – 615, 1958

GRASSINI, P., YANG, H. & CASSMAN, K., G. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.149, p. 1254-1269, 2009.

GUEI, R.G.; WASSON, C.E. Inheritance of some drought adaptative traits in maize: I. Interrelationships between yield, flowering, and ears per plant. **Maydica**, Bergamo, v. 37, p.157-164, 1992.

HANWAY, J., J. Growth Stages of Corn (*Zea mays* L.) **Journal paper n° - 45-46 of the Iowa Agricultural and Home Economics Experiment Station**, Ames, Iowa. Project n°. 1516, 1963.

HERRERO, M. P. & JOHNSON, R. R. Drought Stress and its effects on maize reproductive systems. **Crop Science**, Madison, v. 21, p. 105-110, 1981.

KANG, S.; SHI, W. & ZANG, J. An improved water-use for maize grown under regulated deficit irrigation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 67, p. 207 - 214, 2000

KINIRY, J. R.; RITCHIE, J. T.; MUSSER, R. L. *et al.* The photoperiod sensitive interval in maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 687- 690, 1983.

KIRINY, J. R.; JONES, C. A.; O'TOOLE, J. C. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p. 51-64, 1989.

KINIRY, J. R.; BONHOMME, R. **Predicting Maize Phenology**. In T. Hodges, Predicting crop phenology. CRC Press, Boca Raton, 1991, 223p.

KLAIJ, M. C. & VACHAUD, G. Seasonal water balance of a sandy soil in Niger cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 21, p 313-330, 1992.

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

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2006. 550p

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Editora Universidade de São Paulo, 2005. 335p.

LIMA, I. F. **Geografia de Alagoas**. São Paulo: Editora do Brasil S/A, Coleção didática do Brasil, vol. 14, 1965.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S. & LIRA, C. A. B. O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.1, nº. único, p. 89-95, 2006.

LINDQUIST, J. L.; ARKEBAUER, J. T.; WALTERS, D. T.; KENNETH, G., C. and DOBERMANN, A. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, Stanford, vol. 97, p. 72-78, 2005.

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 (*Zea mays*), **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 37-43, 1999a.

LOZADA, B. I. & ANGELOCCI, L. R. Determinação da temperatura-base e de graus-dia para estimativa dos subperíodo da semeadura à floração de um híbrido de milho (*Zea mays*), **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 31-36, 1999 b.

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

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2006. 10 p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 76).

MARTINS, L., T., G., **Características energéticas em cultivo de milho (*Zea mays* L.) em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas**. Maceió, 2002, 84 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas.

MONTHEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Transaction Royal Society of London Botany**, London, v. 281, p. 277-294, 1977.

MORIZET, J.; TOGOLA, D. Effect et arrière-effect de la sécheresse sur la croissance de plusieurs génotypes de maïs. In: CONFÉRENCE INTERNATIONALE DES IRRIGATIONS ET DU DRAINAGE, 1984, Versailles. **Les besoins en eau des cultures**, Paris, p. 351-360, 1984.

MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. & BENNETT, J.M. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 338-343, 1990.

NIMER, E. **Geografia do Brasil: Região Nordeste**. Rio de Janeiro: IBGE, vol. 2, p. 47-84, 1977.

PANDEY, R. K.; MARANVILLE, J. W.; CHETIMA, M. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 46, n. 1, p. 15 -27, 2000.

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

PEREIRA, S.; FILHO, D. O.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M.; MARTINS J. H. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 306-314, 2006.

RANA, G. & KATERJI, N. Measurements and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review, **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 125-153, 2000

REICHARDT, K., TIMM, L. C. **Solo Planta Atmosfera – Conceitos Processos e aplicações**, São Paulo: Manole, 2004. 478 p.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 21p. (Cooperative Extension Service. Special Report, 48)

RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D. **Milho: efeito da temperatura na duração e na taxa de crescimento de grãos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2003. 40 p. (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa nº 15).

ROMANO, M. R. **Desempenho fisiológico da cultura do milho com plantas de arquitetura contrastante: parâmetro para modelos de crescimento**, Piracicaba, 2005, 100f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

ROSEMBERG, N. J.; BLADE, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2ª ed. New York: John Wiley, 1983. 495p.

SALISBURY, F. B. & ROSS, C.W. **Fisiologia vegetal**. Tradução de V. G. Velázquez. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 1994. 759 p.

SCHUSSLER, R.J.; WESTGATE, M.E. Maize kernel set at low potential: II. Sensivity to reduced assimilates at pollination. **Crop Science**, Madison, v. 31, p.1196-1203, 1991.

SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA E DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO DE ALAGOAS - SEAGRI, **Produtores Debatem Programa de Produção de milho para o Estado de Alagoas**, Disponível em: <http://www.agricultura.al.gov.br/noticias/produtores-debatem-programa-de-produção-de-milho>. Acessado em 19/04/2009

SILVA, C R.; SOUZA, C., F.; JUNIOR, A., S., A.; Uso da reflectometria no domínio da frequência para monitoramento da água do solo. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS DAS PLANTAS, 2007, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: EMBRAPA, 2007. 1 CD-ROM.

SILVA, M. M. **Balanco de água no solo com milho sob plantio direto e diferentes doses de nitrogênio**. Piracicaba, 2007, 86 f. Tese (Doutorado em física do ambiente agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz Piracicaba, Universidade de São Paulo

SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; ENDRES, L; MOURA FILHO, G; BRITO, J. E. D.; FERREIRA JUNIOR, R; ALMEIDA, A. C. S. **Umidade do solo em cultivo de feijão com refletômetro de conteúdo de água sob variações de cobertura do solo e de irrigação**. In: XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2006, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, agosto de 2006.

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

TAIZ, L. & ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 526 p.

TOMMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho TDR (Time domain reflectometry)**. Piracicaba, 1997, 108 f. Tese (Doutorado em energia nuclear na agricultura) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p. 1145-54, 2001.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content; measurement in coaxial lines. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-897, 1980.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: Versão Digital 2, 2006. 463p.

VIEIRA JÚNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; SMIDERLE, O. J.; CICERO, S. M. Efeitos de métodos de irrigação sobre a produção e a qualidade de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 20, n. 1, p. 100-105, 1998.

VIEIRA JUNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D. CICERO, S. M. JORGE, L. A C.; MANFRON, P. A.; MARTIN, N. T. Estimativa da área foliar em milho através de análise de imagens. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 5, n. 1, p. 58-66, 2006.

VIEIRA, H., J.; BERGAMASCHI, H.; COUTINHO, A. R.; ANGELOCCI, L. R. Disponibilidade hídrica do solo e eficiência do feijoeiro em utilizar água e radiação solar. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v. 25, p. 1429-1445, 1990.

VILA NOVA, N.A.; PEDRO JÚNIOR, M.; PEREIRA, A.R.; OMETTO, J.C. **Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima**. Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1972. (Cadernos de Ciências da Terra, São Paulo, n. 30), 8p.

WARRINGTON, I. J.; KANEMASU, E. T. Corn growth response to temperature nad photoperiod I. Seedling emergence, tassel initiation and anthesis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 749-754, 1983.

XAVIER, R. A. & DORNELLAS, P. C. Análise do comportamento das chuvas no município de Arapiraca, região Agreste de Alagoas, **Geografia**, Londrina, v. 14, n. 2, p. 49-64, 2005.

ZHANG, Y.; ELOISE, K.; QIANG, Y.; CHANGMING, L.; SHEN YANJUN, S.; HONGYONG, S. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 64, p. 107-122, 2004.

ZINSELMEIER, C.; WESTGATE,; M. E. JONES, R. J. Kernel set at low water potential does not vary with source sink/ratio in maize. **Crop Science**, Madison, v. 35, p. 158-164, 1995.