

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

PEDRO LUÃ VIEIRA DE SOUZA SARMENTO

**ECOFISIOLOGIA DO MILHO SOB DIFERENTES ÉPOCAS DE SEMEADURA E
DENSIDADES DE PLANTIO**

Rio Largo-AL

2015

PEDRO LUÃ VIEIRA DE SOUZA SARMENTO

**ECOFISIOLOGIA DO MILHO SOB DIFERENTES ÉPOCAS DE SEMEADURA E
DENSIDADES DE PLANTIO**

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

Orientador: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza

Rio Largo- AL

2015

Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Roselito de Oliveira Santos

S246e Sarmiento, Pedro Luã Vieira de Souza..
Ecofisiologia do milho sob diferentes épocas de semeadura e densidades de plantio / Pedro Luã Vieira de Souza Sarmiento. – 2015.
121 f. : il.

Orientador: José Leonaldo de Souza.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2015.

Inclui bibliografia.

1. Cultura do milho - Alagoas. 2. Zea Mays. 3. Coeficiente de extinção de luz. 4. Eficiência no uso da água. 5. Eficiência no uso da radiação. I. Título.

CDU: 633.15 (813.5)

Primeiramente, a Deus, pela saúde e a proteção;

Ao meu pai, Edjan Vieira pelo apoio, honestidade, amizade, caráter e ética de ter conduzindo minha educação e acreditado em meu potencial, apesar da difícil situação que passamos não deixou que faltasse o mais importante na minha formação, à educação, e o exemplo de homem a ser seguido. A minha querida mãe pelo amor, carinho, paciência e companheirismo que sempre esteve lado a lado em todos os momentos da minha vida;

Ao meu querido tio, Eridan Vieira que sempre acreditou em meu esforço e na perseverança em vencer, e a força que me deu durante todos os anos de minha formação e os conselhos como líder da família;

A minha namorada Myrlla Gomes pelo o amor, apoio, incentivo e por sempre está ao meu lado em todas as horas de dedicação acadêmica;

Ao meu filho, Pedro Murilo Belo de Souza e as minhas sobrinhas, Maria Eduarda e Maria Gabriela pela alegria oferecida durante meu curso;

Aos meus irmãos Isabelle Cristina, João Felipe, João Paulo, Maria Edja, Maria Victória e Victor Hugo;

Aos meus avos Maria Honorato (*in memoriam*) e José Caetano;

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor José Leonaldo pelos ensinamentos e exemplo de docente a ser seguido pelo respeito e bastante ética que conduz a profissão de docente;

Ao professor, Iêdo Teodoro, pelos ensinamentos, confiança, conselhos, incentivo e oportunidades;

Ao professor Guilherme Bastos Lyra pelas oportunidades, amigo, conselhos, trabalhos realizado em conjunto, orientações e pelos estágios oferecidos;

Ao professor Ricardo Araújo pelo o apoio e ensinamento ao conduzir o experimento e principalmente nas medidas de radiação solar;

Aos demais professores do CECA que contribuíram de maneira significativa para minha pós-graduação (mestrado): Iêdo Teodoro, Leonaldo Souza, Guilherme Lyra, Eurico Lemos, Mauro Wagner, Vilma, Renan Cantalice, Paulo Wanderley, Leila e outros;

Aos meus eternos amigos integrantes do grupo de pesquisa Agrometeorologia e Recursos Naturais: Adolpho Rocha, Ricardo, Cesar Augusto, Marcelo Augusto, Arthur Cantarelli, Constantino, Victor Guimarães, Derick Santana, Delck Teodoro, Lekson, André Carvalho, Joelmir Farias, Renato Araújo, Ivomberg, Franklin Anjos e Marcelo, pela convivência e momentos compartilhados;

Aos amigos em especial, Adolpho Rocha, Marshall Victor, Ricardo Araujo e Joelmir Farias pela amizade e conselhos durante todo o curso;

Aos amigos de mestrado, Adolpho Rocha, Hugo Soriano, Danielle, Heitor, David Vitor, Leopoldo Sá, Antonio Barbosa, Carlos Assis, entre outros;

A BMS Micro-Nutrients, pela parceria e disponibilidade dos adubos foliares;

Ao programa de pós-graduação, produção vegetal, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), fundação do Ministério da Educação (MEC), pelo desempenho na expansão e consolidação da pós-graduação stricto sensu (mestrado e doutorado) em todos os estados da Federação;

«Não reclame se a terra não é boa, que o clima não é favorável, não lhe cabe julgar a terra ou o tempo, tua missão é semear!».ö

Vade Bernaski

RESUMO

A radiação fotossinteticamente ativa, acúmulo de unidades térmicas e o arranjo espacial de plantas exercem grande influência no crescimento, desenvolvimento e rendimento de culturas agrícolas, quando a disponibilidade de água no solo não é limitada. Por isso, o presente trabalho objetivou-se avaliar o crescimento, desenvolvimento e o rendimento da cultura do milho sob condições agrometeorológicas em diferentes épocas de semeio e densidades de plantas. O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), numa área de 2.736 m². A pesquisa foi composta por quatro épocas: E1 (28/06/13), E2 (08/07/13), E3 (18/07/13) e E4 (28/07/13) e quatro densidades de semeadura de milho: D1 (125.000); D2 (87.500); D3 (50.000) e D4 (37.500) plantas por hectare, irrigado por gotejamento. O delineamento experimental foi blocos casualizados no esquema de parcelas subdivididas (4×4), com quatro repetições. O espaçamento entrelinhas foi de 0,80m, sendo cada parcela composta por época de semeadura e as subparcelas por densidades de semeadura. As subparcelas foram constituídas de 5 linhas com 7 metros. A área foliar foi determinada pelo método indireto a partir de 4 plantas marcadas aleatoriamente em cada subparcela, sorteadas logo após a semeadura, as medidas foram feitas semanalmente. O índice de área foliar foi determinado pela relação entre o total de área foliar pela área ocupada pelas plantas. A irradiância solar fotossintética incidente foi estimada como 43% da irradiância solar global, que foi medida por um piranômetro Eppley (modelo 848, B&W) localizado na estação agrometeorológica do CECA situado ao lado do experimento. A irradiância solar fotossintética transmitida foi medida através de um sensor Quatum linear (LI-191SA) colocado diagonalmente na superfície do solo entre as linhas de semeadura. A época 4 apresentou a maior temperatura média do ar em relação as outras épocas e isso provocou redução no ciclo da cultura. De acordo com as medidas do conteúdo de água no solo, tratamentos com diferentes densidades populacional apresentaram demanda hídrica distinta. A evapotranspiração potencial acumulada variou de 522 mm na densidade 2 e 398 mm na densidade 3. O cultivo mais adensado proporcionou menor diâmetro do colmo, menor comprimento e diâmetro de espiga e menor peso de grãos por espiga. O máximo rendimento (6,1 Mg ha⁻¹) foi apresentado pela densidade de 50.000 plantas ha⁻¹, enquanto que a população com 125.000 plantas ha⁻¹ apresentou o menor rendimento de grãos (4,7 Mg ha⁻¹). As épocas de semeadura não apresentaram diferença estatística para rendimento de grãos. O coeficiente de extinção (k) da luz foi inversamente proporcional ao IAF. A fração de irradiância transmitida diminuiu ao longo do cultivo. Na densidade de 125.000 pl ha⁻¹, no estágio fenológico V7, cerca de 60% da irradiância incidente foi transmitida para o solo, enquanto que em D4 foi aproximadamente 80%. Todas as densidades interceptaram mais luz no IAF máximo. A D1 apresentou o maior IAF estimado (5,68) enquanto que a D4 apresentou o menor IAF estimado (2,98) e o maior k (0,66). A eficiência no uso da radiação e da água, para produção de biomassa, foi sempre maior nos tratamentos mais adensados. A variedade Al bandeirante responde negativamente ao aumento das densidades de plantas, para rendimento de grãos.

Palavras-chave: *Zea mays* L.. Graus-dia. Coeficiente de extinção de luz. Eficiência no uso da água e Eficiência no uso da radiação.

ABSTRACT

The photosynthetically active radiation, accumulation of thermal units and the spatial arrangement of plants have great influence on growth, development and yield of crops when the water availability in the soil is not limited. Therefore, the objective of this study is to evaluate maize growth, development and yield in agrometeorological conditions at different times of sowing and plant densities. The experiment was conducted in the experimental area of the Centro de Ciências Agrárias (CECA) of the Federal University of Alagoas (UFAL), an area of 2,736 m². The research was composed of four sowing dates: [E1 (June 28), E2 (July 08), E3 (July 18) and E4 (July 28), 2013] and four maize planting density: D1 (125,000); D2 (87,500); and D4 (37,500) plants per hectare under drip irrigation. The experimental design was a randomized block in split plots (4×4), with four replications. The spacing was 0.80 m, and each plot was composed by the sowing dates and the subplots composed by plant densities. The subplot was formed with five rows of seven meters. Leaf area was determined by the indirect method from four plants randomly selected in each subplot, drawn shortly after sowing, the measurements were made weekly. Leaf area index was determined by the ratio between total leaf area by the area occupied by plants. The photosynthetic solar irradiance (Rf) was estimated as 43% of global solar irradiance (Rg), which was measured by an Eppley pyranometer (model 848, B & W) located in the agrometeorological station of the CECA situated next to the experiment. Photosynthetic irradiance transmitted (Rf_T) was measured using a linear Quantum sensor (LI-191SA) placed diagonally on the soil surface between the planting rows. The season 4 showed the highest mean air temperature comparing to other times and this caused a reduction in crop cycle. According to the soil water content measurements, treatments with different plant population densities showed distinct water demand. The accumulated potential evapotranspiration ranged from 522 mm in the density 2 and 398 mm in density 3. The denser cultivation provided a smaller stem diameter, shorter ear length and diameter and lower grain weight per ear. The maximum yield (6.1 Mg ha⁻¹) was obtained by density of 50,000 plants ha⁻¹, while the population with 125,000 plants ha⁻¹ had the lowest grain yield (4.7 Mg ha⁻¹). The sowing dates were not significantly different for yield. The extinction coefficient (k) of light is inversely proportional to the LAI. The fraction of transmitted irradiance decreased over cultivation. At a density of 125,000 plants ha⁻¹ in V7 growth stage, approximately 60% of irradiance was transmitted to the soil, whereas in D4 it was approximately 80%. All densities intercepted more light in maximum LAI. D1 showed the highest estimated LAI (5.68), while D4 showed the lowest estimated LAI (2.98) and the highest k (0.66). Water and radiation use efficiency, for biomass production, was always higher in denser treatments. The Al bandeirante variety responds negatively to the increased plant densities, for grain yield.

Key-words: *Zea mays L.*. Degree days. Light extinction coefficient, Efficiency in water use (WUE) and Efficiency in the use of radiation (RUE).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1-** Comportamento da radiação fotossinteticamente ativa interceptada e transmitida, em função do aumento populacional de plantas..... 29
- Figura 2-** Fluxograma dos fatores que afetam o rendimento de grãos do milho..... 30
- Figura 3-** Produção por unidade de planta e por unidade de área, em função do aumento populacional de planta..... 31
- Figura 4-** Localização da pesquisa experimental, mostrando o estado de Alagoas e o município do Rio Largo e Centro de Ciências Agrárias (CECA). 36
- Figura 5-** Croqui do experimento 37
- Figura 6-** Preparo do solo, adubação e plantio. A) Plantas daninha dessecada; B) Abertura dos sulcos; C) Adubação de fundação no fundo do sulco; D) Cobertura do adubo; E) Gabarito das sementes; F) Cobertura das sementes. 38
- Figura 7-** Controle da lagarta do cartucho (*Spodopdera Frugiperda*). Aplicação do inseticida (A); Lagartas mortas após a aplicação (B). 39
- Figura 8-** Coleta das plantas para determinação da biomassa seca. A) Plantas inteiras; B) Folhas separadas; C) colmos separados; D) Inflorescência masculina e feminina; E) Amostras na estufa; F) Pesagem das amostras. 40
- Figura 9-** Sonda de umidade de solo acoplado com o sistema de aquisição de dados e painel solar. A) Caixa do datalogger e painel solar; B) Sonda enterrada de 0 a 30 cm; C) Sonda enterrada de 30 a 60 cm. 44
- Figura 10-** Curva de calibração do TDR, relacionando umidade volumétrica () e período (P) para o solo do experimento na profundidade de 0 a 0,60 m. 44
- Figura 11-** Uma representação gráfica do modelo de evapotranspiração proposto (E + T). Em que, H é o fluxo de calor sensível, T é o fluxo de calor latente de transpiração, E é o fluxo de calor latente de evaporação, (z_0) comprimento de rugosidade e o (d) do deslocamento do plano zero. 45
- Figura 12-** Equipamentos de medir irradiância transmitida. A) Sensor Line Quantum (LI-191SA), na diagonal; B) caixa do datalogger; C) Datalogger ligado a bateria. 50
- Figura 13-** Regressão linear entre medidas do sensor LI-191SA e medidas dos sensores padrão LI-190SA, Li-COR. 51

- Figura 14-** Temperatura média do ar ($T_{média}$, °C) e umidade relativa média do ar ($UR_{média}$, %), durante as épocas de semeadura (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013), enfatizando dia do plantio e da colheita..... 55
- Figura 15-** Transmitância atmosférica (Kt), irradiação fotossinteticamente incidente (Hf_I , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) e chuva (mm), em função dos dias após a semeadura (DAS) para as quatro épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013)..... 57
- Figura 16-** Irradiação solar extraterrestre (H_0 , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), irradiação solar global (H_g , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), irradiação fotossintética incidente (Hf_I , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), irradiação fotossintética interceptada (Hf_{Int} , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) para densidades (D1, 125000 pl ha^{-1}), (D2, 87500 pl ha^{-1}), (D3, 50000 pl ha^{-1}) e (D4, 37500 pl ha^{-1}), nas quatro épocas..... 59
- Figura 17-** Capacidade de campo (CC), umidade crítica (UC), ponto de murcha (PM), precipitação pluvial (p), irrigação (I), armazenamento de água (ARM) e índice de área foliar (IAF) para densidades 1 (D1, 125000 pl ha^{-1}), 3 (D3, 50000 pl ha^{-1}) e 4 (D4, 37500 pl ha^{-1}), em função dos dias após a semeadura (DAS) para E1 (A) e E2 (B)..... 61
- Figura 18-** Capacidade de campo (CC), umidade crítica (UC), ponto de murcha (PM), precipitação pluvial (p), irrigação (I), armazenamento de água (ARM) e índice de área foliar (IAF) para densidades 1 (D1, 125000 pl ha^{-1}) e 2 (D2, 87500 pl ha^{-1}), em função dos dias após a semeadura (DAS) para época 3 (A) e época 4 (B)..... 62
- Figura 19-** Evaporação (E), transpiração (T), evapotranspiração potencial (ET) e cobertura do solo (CS estimada), em função dos dias após a semeadura (DAS) para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha^{-1}), (D2, 87500 pl ha^{-1}), (D3, 50000 pl ha^{-1}) e (D4, 37500 pl ha^{-1})... 65
- Figura 20-** Regressão linear forçada a passa pela origem entre os estádios fenológicos (1-VE, 2-V3, 3-V6, 4-V9, 5-V12, 6-V18, 7-VT, 8-R1, 9-R2, 10-R3, 11-R4, 12-R5 e 13-R6) e graus-dia acumulado (GD, GD) para as épocas de semeadura (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013)..... 70
- Figura 21-** Regressão para altura de planta (AP), diâmetro do colmo (DC) e biomassa seca (BS), em função das densidades de semeadura do milho..... 73
- Figura 22-** Índice de área foliar (IAF) em função dos graus dias acumulado (GDA), nos estádios fenológicos vegetativos (V3, V6, V9, VT) e reprodutivos (R1, R3, R5 e R6) de plantas de milho para épocas e densidades de semeadura..... 75

- Figura 23-** Altura de planta (AP) e diâmetro do colmo em função dos graus dias acumulado (GDA), nos estádios fenológicos vegetativos (V3, V6, V9, VT) e reprodutivos (R1, R3, R5 e R6) de plantas de milho para épocas e densidades de semeadura. 80
- Figura 24-** Biomassa seca em função dos graus dias acumulado (GDA), nos estádios fenológicos vegetativos (V3, V6, V9, VT) e reprodutivos (R1, R3, R5 e R6) de plantas de milho para épocas e densidades de semeadura. 83
- Figura 25-** Relação entre acúmulo de matéria seca (g m^{-2}), e evapotranspiração potencial acumulada (mm) e a regressão linear forçada a passar pela origem, em que a eficiência no uso da água (EUA) é o coeficiente angular da reta, para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha^{-1}), (D2, 87500 pl ha^{-1}), (D3, 50000 pl ha^{-1}) e (D4, 37500 pl ha^{-1})... 84
- Figura 26-** Regressão linear para eficiência no uso da água para rendimento de grãos (EUAg) e eficiência no uso da água para rendimento de biomassa seca aérea (EUA), em função das densidades de semeadura do milho. 86
- Figura 27-** Relação entre a fração de irradiância transmitida (fRf_T), pelo índice de área foliar (IAF) e o coeficiente de extinção de luz (k), estimado por regressão exponencial para as densidades de semeadura (D1, 125000 pl ha^{-1}), (D2, 87500 pl ha^{-1}), (D3, 50000 pl ha^{-1}) e (D4, 37500 pl ha^{-1})..... 89
- Figura 28-** Relação entre o coeficiente de extinção de luz (k) e a densidade de plantas por hectare (D) de milho. 91
- Figura 29-** Relação entre acúmulo de matéria seca (g m^{-2}), e irradiação fotossinteticamente interceptada acumulada (MJ m^{-2}) e a regressão linear forçada a passar pela origem, em que a eficiência no uso da radiação (EUR) é o coeficiente angular da reta, para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha^{-1}), (D2, 87500 pl ha^{-1}), (D3, 50000 pl ha^{-1}) e (D4, 37500 pl ha^{-1}). 92
- Figura 30-** Regressão linear para eficiência no uso da radiação para rendimento de grãos (EUAg) e eficiência no uso da radiação para rendimento de biomassa seca aérea (EUA), em função das densidades de semeadura do milho. 95
- Figura 31-** Estimativa da cobertura do solo (CS) e índice de área foliar estimado (IAF), no decorrer de dias após a semeadura (DAS) para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2014) e densidades (D1, 125000 pl ha^{-1}), (D2, 87500 pl ha^{-1}), (D3, 50000 pl ha^{-1}) e (D4, 37500 pl ha^{-1}) do milho. 97

Figura 32- Relação entre a cobertura do solo (CS) e o índice de área foliar (IAF), para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha ⁻¹), (D2, 87500 pl ha ⁻¹), (D3, 50000 pl ha ⁻¹) e (D4, 37500 pl ha ⁻¹) do milho.	98
Figura 33- Regressão para as variáveis de produção, em função das densidades de semeadura do milho.	102
Figura 34- Regressão quadrática para rendimento de grãos, em função das densidades de semeadura do milho.	104

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1-** Valores de coeficiente de extinção de luz de espécies agrícolas cultiváveis..... 28
- Tabela 2-** Valores acumulados de evapotranspiração potencial, evaporação do solo, transpiração, radiação fotossintética incidente e interceptada, chuva + irrigação e unidades térmicas para as densidades (D1, 125000 pl ha⁻¹), (D2, 87500 pl ha⁻¹), (D3, 50000 pl ha⁻¹) e (D4, 37500 pl ha⁻¹) das quatro épocas..... 66
- Tabela 3-** Estádios fenológicos em função dos graus-dia acumulado (GD, GD) e dias após a semeadura (DAS) para as épocas de semeadura (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2014). 69
- Tabela 4-** Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de épocas de semeadura e densidades de semeadura das variáveis: altura de planta (AP) final, diâmetro do colmo (DC) máximo, índice de área foliar (IAF) máximo e biomassa seca (BS) acumulada..... 71
- Tabela 5-** Efeito de épocas de semeadura na altura (cm), diâmetro do colmo (cm), índice de área foliar (IAF) e biomassa aérea (kg ha⁻¹) de milho (*Zea mays L.*). Rio Largo-AL, 2015. 72
- Tabela 6-** Quadrados médios da análise do desdobramento dos efeitos de épocas de semeadura dentro de cada nível de densidades de semeadura para índice de área foliar (IAF). 74
- Tabela 7 -** Valores médios de índice de área foliar (IAF) máximo, das quatro épocas e quatro densidades de semeadura do milho (*Zea mays L.*). Rio Largo, 2013..... 74
- Tabela 8-** Parâmetros da equação, erro padrão de estimativa e coeficiente de determinação dos modelos logístico, log-normal e o de Boltzmann para as variáveis de altura de planta (AP), biomassa seca (BS), índice de área foliar (IAF) e diâmetro do colmo (DC) em função dos graus-dia acumulados para as densidades das épocas 1 e 2... 76
- Tabela 9 -** Parâmetros da equação, erro padrão de estimativa e coeficiente de determinação dos modelos logístico, log-normal e o de Boltzmann para as variáveis de altura de planta (AP), biomassa seca (BS), índice de área foliar (IAF) e diâmetro do colmo (DC) em função dos graus-dia acumulados para as densidades das épocas 3 e 4. 77
- Tabela 10-** Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de épocas de semeadura e densidades de semeadura para eficiência no uso da água para rendimento de biomassa seca (EUA) e para rendimento de grãos (EUAg)..... 85

Tabela 11- Efeito de épocas de semeadura na eficiência no uso da água para produção de biomassa (EUA, g L ⁻¹) e para produção de grãos (EUAg, g L ⁻¹) de milho (<i>Zea mays L.</i>). Rio Largo-AL, 2013.	86
Tabela 12- Valores de rendimentos de grãos (RG), irradiação interceptada acumulada (HF_I acum), evapotranspiração total (ET), eficiência o da água para rendimento de grãos (EUAg) e eficiencia no uso da radiação para rendimento de grãos para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha ⁻¹), (D2, 87500 pl ha ⁻¹), (D3, 50000 pl ha ⁻¹) e (D4, 37500 pl ha ⁻¹).....	87
Tabela 13- Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de épocas de semeadura e densidades de semeadura das variáveis: eficiência no uso da água para rendimento de biomassa (EUA) e eficiência para rendimento de grãos (EURg).	93
Tabela 14- Efeito de épocas de semeadura na eficiência no uso da água para produção de biomassa (EUA, g L ⁻¹) e para produção de grãos (EUAg, g L ⁻¹) de milho (<i>Zea mays L.</i>). Rio Largo-AL, 2013.	94
Tabela 15- Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de épocas de semeadura e densidades de semeadura das variáveis de produção: comprimento de espiga (CE), diâmetro de espiga (DE), massa de espiga despilhada (MED), massa de grão por espiga (MGE), massa de mil grãos (M1000), número de espiga por planta (NEP), número de fileira de grãos, número de grãos por fileira (NGF) e rendimento de grãos (RG).	100
Tabela 16- Efeito de épocas de semeadura nas variáveis de produção do milho: comprimento de espiga (CE), diâmetro de espiga (cm), massa de espiga despilhada (MED), massa de grãos por espiga (g), massa de mil grãos (g), número de espiga por planta (NEP), numero de fileira de grãos (NFG), número de grãos por fileira (NGF) e rendimento de grãos (RG) de milho (<i>Zea mays L.</i>). Rio Largo-AL, 2013.	101
Tabela 17- Índice de colheita, para épocas (E1 28/062013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha ⁻¹), (D2, 87500 pl ha ⁻¹), (D3, 50000 pl ha ⁻¹) e (D4, 37500 pl ha ⁻¹) do milho.	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFD - água facilmente disponível

AP - altura de planta

ARM - armazenamento de água no solo

A_1 - valor inicial do ciclo da cultura (parâmetro do modelo de Boltzmann)

a_1 - amplitude do índice de área foliar (parâmetro do modelo log-normal)

A_2 - valor final do ciclo da cultura (parâmetro do modelo de Boltzmann)

a_2 - valor de GDA no qual IAF é máximo (parâmetro do modelo log-normal)

a_3 - grau de decaimento do IAF (parâmetro do modelo log-normal)

BS - biomassa seca

BS_{acum} - biomassa seca acumulada

CAD - conteúdo de água disponível

CC - capacidade de campo

CE - comprimento de espiga

CECA - Centro de Ciências Agrárias

c_p - constante do calor específico do ar ($MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)

CS - cobertura da superfície do solo

d - deslocamento do plano zero

D - déficit de pressão de vapor do ar (kpa)

DAE - dias após emergência

DAS - dias após a semeadura

DE - diâmetro de espiga

ds - densidade do solo

dx - incremento de y em função do aumento de GDA (parâmetro do modelo log-normal)

D1 - densidade 1 (125.000 plantas por hectare)

D2 - densidade 2 (87.500 plantas por hectare)

D3 - densidade 3 (50.000 plantas por hectare)

D4 - densidade 4 (37.500 plantas por hectare)

DC - diâmetro do colmo

E - Evaporação

E1 - época 1 (28/06/13)

E2 - época 2 (08/07/13)

E3 - época 3 (18/07/13)

E4- época 4 (28/07/13)

es - pressão de vapor à superfície do solo

ET - evapotranspiração potencial

EUA - eficiência no uso da água para a biomassa seca total (g L^{-1})

EUA_g - eficiência no uso da água para rendimento de grãos (g L^{-1})

EUR - eficiência no uso da radiação para a biomassa seca total (g MJ^{-1})

EUR_g - eficiência no uso da radiação para rendimento de grãos (g MJ^{-1})

fRf_T - fração de irradiância transmitida

FV - fonte de variação

G - fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)

GD - graus-dia

GDA - graus-dia acumulado

GL - grau de liberdade

g m^{-2} - grama por metro quadrado

h - altura da cultura (m)

Ha - irradiação solar no topo da atmosfera

Hf_I - irradiação solar fotossintética incidente

Hf_Int - irradiação fotossintética interceptada

Hg - irradiação solar global

I - irrigação

IAF - índice de área foliar

IC - índice de colheita

IAF_{ef} - índice de área foliar efetivo

k - coeficiente de extinção da luz

K - constante de von Kármán

Kt - índice de claridade ou transmitância atmosférica

l - largura média da folha do dossel (m)

LARAS - laboratório de agrometeorologia e radiometria solar

L ha^{-1} - litro por hectare

L h^{-1} - litro por hora

g L^{-1} - grama por litro

Mg ha^{-1} ó Megagrama por hectare

MED - massa de espiga despalhada

MGE - massa de grão por espiga

MS - matéria seca

MJ m⁻² - megajoule por metro quadrado

g MJ⁻¹ - grama por megajoule

mm - milímetro

n - coeficiente de extinção para o coeficiente de transferência turbulenta no dossel

NEP - número de espiga por planta

NFG - número de fileira de grãos

NGF - número de grãos por fileira

nm - nanômetro

P - período da leitura do TDR

p - precipitação pluvial

PM - ponto de murcha

P1000 - peso de mil grãos

pl ha⁻¹ - plantas por hectare

r - taxa máxima de crescimento relativo (parametro do modelo logistico)

rb - resistência média da camada limite

RFA- radiação fotossinteticamente ativa

RGE - relação de peso de grão por espiga

Rf_I - irradiância fotossinteticamente incidente

Rf_T - irradiação solar fotossintética transmitida

Rg - irradiância solar global

R_n - saldo de radiação acima do dossel (MJ m⁻² dia⁻¹)

R_{ns} - saldo de radiação na superfície do solo (MJ m⁻² dia⁻¹)

RG - rendimento de grão

r_a^c - resistência da camada limite do dossel

r_s^c - resistência estomática do dossel

r_a^a () - resistência aerodinâmica entre o dossel e a altura de referência para IAF máximo

r_a^a (0) - resistência aerodinâmica entre o dossel e a altura de referência para solo

r_a^a - resistência aerodinâmica entre o dossel e a altura de referência

r_a^s - resistência aerodinâmica entre o solo e a altura média do dossel

r_a^s () - resistência aerodinâmica entre o solo e a altura média do dossel para IAF máximo

r_a^s (0) - resistência aerodinâmica entre o solo e a altura média do dossel para solo

r_s^s - resistência da superfície do solo

r_{ST} - resistência média estomática

R1 - estágio reprodutivo florescimento

R2 - estágio reprodutivo grão leitoso

R3 - estágio reprodutivo grão pastoso

R4 - estágio reprodutivo grão farináceo

R5 - estágio reprodutivo farináceo duro

R² - coeficiente de determinação

R6 - maturação fisiológica

T - transpiração

t - teste de student

Tm - temperatura média do ar

Tb - temperatura basal da planta

TDR - time domain reflectometry

Ts - temperatura do solo

u_h - velocidade do vento no topo do dossel

URm - umidade relativa do ar

UC - umidade crítica

VE - estágio vegetativo, emergência

V1 - estágio vegetativo, 1ª folha expandida

V2 - estágio vegetativo, 2ª folha expandida

V3 - estágio vegetativo, 3ª folha expandida

VN - estágio vegetativo, enésima folha expandida

VT - estágio vegetativo, pendoamento

W₀ - valor inicial do ciclo da cultura (parâmetro do modelo logístico)

W_f - valor final do ciclo da cultura (parâmetro do modelo logístico)

t ó tonelada

t ha⁻¹ ó tonelada por hectare

u - velocidade do vento na altura de referência z (m s⁻¹)

UFAL - Universidade Federal de Alagoas

X_o - ponto de inflexão (parâmetro do modelo de Boltzmann)

z - altura de referencia (m)

z₀ - comprimento de rugosidade

LISTA DE SÍMBOLOS

- conteúdo de água volumétrico

cc - conteúdo de água volumétrico na capacidade de campo

pm - conteúdo de água volumétrico no ponto de murcha

$\hat{U}GDA$ - somatório da energia térmica

- fator de ponderação para a evaporação do solo

- calor latente de vaporização da água

\hat{e} - inclinação da curva de pressão de vapor [$kPa^{\circ}C^{-1}$]

- densidade atmosférica ($kg\ m^{-3}$)

- constante psicrométrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	Aspectos gerais e importância econômica do milho	24
2.2	Radiação solar sobre o dossel das plantas	26
2.3	Manejo populacional e demanda hídrica do milho	29
3	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1	Localização e descrição do experimento.....	36
3.2	Delineamento experimental e tratamentos.....	37
3.3	Implantação e condução do experimento	38
3.4	Análises de crescimento e desenvolvimento da planta	40
3.5	Medidas ambientais e hídricas do solo	42
3.5.1	Medidas hídricas do solo	43
3.5.2	Evapotranspiração potencial	45
3.5.2.1	Resistência da superfície do solo	47
3.5.2.2	Resistências do dossel.....	47
3.5.2.3	Resistência aerodinâmica	48
3.6	Eficiência no uso da água.....	49
3.7	Medidas de radiação	50
3.7.1	Coefficiente de extinção da luz	51
3.7.2	Cobertura do solo	52
3.7.3	Eficiência do Uso da Radiação	52
3.8	Variáveis de produção.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	Características Meteorológicas	54
4.2	Características hídricas do solo	60
4.3	Evaporação, transpiração e evapotranspiração potencial.....	64
4.4	Desenvolvimento e variáveis biométricas	68
4.4.1	Estádios Fenológicos.....	68
4.4.2	Variáveis de Crescimento	71
4.5	Eficiência no uso da água.....	84
4.6	Coefficiente de extinção de luz	88
4.7	Eficiência no uso da radiação.....	92

4.8	Cobertura do solo (CS)	96
4.9	Variáveis de produção.....	99
5	CONCLUSÕES	106
	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

A matéria prima do milho é utilizada principalmente para produção de ração animal, devido à grande demanda de carnes no mundo. No Brasil, a cultura é o segundo cereal mais plantado, com grande diversificação no manejo, que vai da agricultura familiar até as lavouras com altos níveis tecnológicos. Contudo o rendimento do milho no território brasileiro é muito baixo, principalmente na região Nordeste do país, em decorrência de fatores ligados a manejo da cultura, a distribuição irregular das chuvas e ao baixo nível tecnológico aplicado pelos pequenos produtores. Na região dos tabuleiros costeiros de Alagoas a cultura passa por estresse hídrico acentuado na estação seca (outubro a março), quando chove apenas 30 % da média (1800 mm).

As modificações no manejo e nos tratos culturais, necessária para aumentar o rendimento agrícola, correspondem a disponibilidade de genótipos com elevado potencial genético, adequada fertilidade de solo, qualidade física dos solos, níveis adequado de umidade no solo e o melhor arranjo espacial de plantas. Entre as práticas agronômicas citadas anteriormente, a densidade plantas deve ser definido adequadamente atendendo as condições de fertilidade de solo, arquitetura foliar, potencial produtivo dos genótipos dentre outros, de forma a maximizar a produtividade do milho, pela a otimização de água, nutrientes e principalmente pela maior interceptação de radiação fotossinteticamente ativa, pois é o fator mais limitante na produtividade quando a cultura se encontra em condições ótima de manejo, livre de pragas e doença.

A ótima densidade populacional de plantas proporciona maior produtividade, entretanto ela é bastante variada de acordo com o genótipo e o ambiente na qual a cultura é exposta. O melhor adensamento depende das condições meteorológicas e edáfica da região e principalmente das características fisiológicas e morfológicas da planta, como a conversão de radiação e o ângulo de inserção foliar. Os cultivares mais tolerante ao adensamento são aqueles que apresentam a arquitetura foliar mais ereta, pois possibilitam maior interceptação da radiação solar e menor competição intra-específica, quando submetido a elevadas densidades de plantas. A escolha da densidade ótima de plantas pode ser realizada através de simulação de modelos de culturas ou por estudos experimentais de campo.

O ajuste de modelos de crescimento, empírico ou mecanístico, se apresentam como ferramentas úteis para modelar o crescimento e o desenvolvimento das plantas, através de representações matemática, de maneira a subsidiar a escolha de genótipos que melhor se adaptam a condições térmicas distintas, bem como as melhores épocas de cultivo, e manejo

agronômico. Para a cultura do milho existem modelos específicos (CERES-Maize e o modelo de MuchowóSinclairóBennett). Entretanto, há uma série de dificuldade para validar esses modelos, pois eles precisam de parâmetro de entrada, em condições padrão de crescimento, livre de pragas e doenças, sem estresses hídricos e nutricionais, para estimativa precisa do rendimento potencial da cultura.

Diante do exposto, o objetivo geral do presente trabalho foi avaliar o crescimento, desenvolvimento e o rendimento da cultura do milho sob condições agrometeorológicas em diferentes épocas de semeio e densidades de plantas, mais especificamente: (I) Avaliar épocas de semeadura do milho no período chuvoso da região; (II) determinar evapotranspiração da cultura do milho; (III) Determinar o coeficiente de extinção de luz; (IV) Determinar a cobertura do solo; (V) avaliar eficiência no uso da água e da radiação solar para produção de biomassa e rendimento de grãos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais e importância econômica do milho

O setor sucroenergético busca alternativa para aumentar os níveis de utilização da sua indústria ao longo do ano. Uma alternativa seria o processamento de milho atuar na entressafra da cana-de-açúcar e a produção de etanol passar a ser derivada da cana e do milho de maneira compartilhada. Outra possibilidade é o cultivo de outra planta paralela a produção milho, para produzir vapor e energia elétrica, e o parque industrial passar a produzir na safra e na entressafra. Do total do milho destinado a indústria de etanol, um terço pode retornar para a produção de ração animal (MILANEZ et al., 2014).

A crescente preocupação na segurança alimentar, energética e a grande demanda para alimentação animal faz do milho uma cultura de grande importância econômica para o Brasil e para o mundo. Na safra de milho de 2014/2015 há uma estimativa de produção recorde mundial, de 991,6 milhões de toneladas (t), superando em 2,3 milhões de t colhido na safra anterior. O Brasil ocupa a terceira posição do ranking mundial com previsão de 79 milhões de toneladas (2014/2015), numa área de aproximadamente 16 milhões de hectares (CONAB, 2014; FIESP, 2014). Entretanto, o rendimento de grãos da cultura no Brasil ainda é baixo, principalmente na região Nordeste, quando comparado com os maiores produtores mundiais (Estados Unidos da América e China). A região Centro-Sul responde por 88% da produção brasileira, enquanto o Norte/Nordeste pelos 12% restantes. No Nordeste brasileiro a produtividade média ($2,6 \text{ t ha}^{-1}$) está 49% inferior à nacional ($5,1 \text{ t ha}^{-1}$), além disso, alguns estados do Nordeste Brasileiro não chegam a produzir $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ como, por exemplo, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Paraíba. Alagoas possui rendimento médio de $0,9 \text{ t ha}^{-1}$, enquanto o estado vizinho, Sergipe, produz $4,7 \text{ t ha}^{-1}$ (CONAB, 2014; FIESP, 2014). De acordo com Carvalho et al., (2004), no Brasil, o milho pode alcançar elevados rendimentos agrícolas (10 t ha^{-1}), em condições experimentais e por agricultores que utilizam altos níveis tecnológicos.

O problema do baixo rendimento agrícola do milho no Nordeste brasileiro está se deve ao baixo nível tecnológico empregado, o uso de variedades com baixo potencial genético, cultivo consorciado conduzido de maneira errada e a irregularidade das chuvas. No Brasil, os primeiros estados a trabalhar com pesquisas de híbridos, foram, principalmente, Minas Gerais e Rio Grande do Sul (KRUG; VIEGAS; PAOLIERI, 1943). Os principais genótipos semeados no Nordeste brasileiro são variedades, com baixo potencial produtivo e não adaptada a

condição distinta de cada região. De acordo com Shaun (1990), 50% da produção brasileira de milho são obtidas em áreas inferiores a 10 hectares, cujos produtores não apresentam condições financeiras para aquisição de sementes de híbridos, devido ao seu elevado custo. Conforme Bisognin et al., (1997), o valor de 1 kg de semente de híbrido corresponde a 15 kg de grãos vendidos pelo agricultor. De acordo com Cruz et al., (2009) o custo de plantar um hectare com semente de variedade de milho é aproximadamente 6 vezes menor do que o preço de um híbrido simples. Sangoi et al., (2003) avaliando análise técnica-econômica de níveis de manejo da cultura do milho, com híbridos e variedades encontram que o valor de um kg de semente de variedades (CEP304 e Amarelão do Campo Belo) custou R\$1,6, enquanto que híbrido simples (Pionner 32R21) e duplo (AG 303) variou de R\$ 4,0 a 5,0, respectivamente.

O baixo custo e a facilidade de produzir sementes de variedades, para ser cultivada em sucessivos anos agrícolas sem que ocorram perdas significativas em suas características e no rendimento de grãos, explicam a utilização das variedades de milho, pelos pequenos e médios produtores. As variedades cultivadas apresentam ampla base genética, enquanto híbridos possuem grande uniformidade, devido a heterose, alto potencial produtivo, mais resistentes as doenças, pragas e ao acamamento, porém eles exigem alto nível tecnológico na lavoura. Os híbridos podem ser divididos dependendo do cruzamento em: híbrido simples, híbrido duplo, híbridos triplos e híbridos ótop crossö (SAWAZAKI; PATERNIANI, 2004). As desvantagens dos híbridos para agricultura é o elevado custo das sementes e a sua necessidade da aquisição anual. Entretanto, o elevado preço será recompensado pelo aumento no rendimento de grãos e a alta qualidade do produto colhido (KRUG; VIEGAS; PAOLIERI, 1943). Sangoi et al., (2003) observaram um ganho na margem bruta variando entre R\$ 697,71 a 1093,25, para híbrido simples, R\$ 219,22 a 293,24 para híbrido duplo e R\$ 104,86 a 130,86 para variedades, em função do nível tecnológico aplicado e em diferentes locais.

De acordo com os resultados de Bisognin et al., (1997), numa área pertencente aos assentamentos do município de Lebon Régis, SC, a estatura das variedades foram sempre maiores que a do híbrido utilizado como testemunha, devido as variedades não terem sido anteriormente submetidas a seleção artificial para sua redução e por serem adaptadas a baixa densidade populacional de plantas, em contraste com aquela recomendada e utilizada para o cultivo de híbridos. Conforme os mesmos autores, 17 variedades de polinização aberta apresentaram rendimento superior ao do híbrido, entretanto vale a pena salientar que o experimento foi conduzido em baixo nível tecnológico, visando simular as condições de cultivo empregadas pelos produtores da região do experimento. Seus resultados mostram que pequenos produtores de milho que não tem condições de adotar altos níveis tecnológicos em

sua lavoura, o uso de variedades de polinização aberta é uma alternativa viável, sem deixar a desejar para variedades híbridas em termos de rendimento de grãos em condições adversas para o cultivo. Souza et al. (2013) reforça a hipótese e afirma que não é adequado generalizar qual o melhor tipo de cultivar, pois em alguns casos, a variedade de polinização aberta apresentam desempenho melhor do que alguns híbridos

Carvalho et al., (2002) estudando a adaptabilidade e a estabilidade de diferentes cultivares de milho, sob diferentes condições ambientais do Nordeste brasileiro encontraram a média de rendimentos de grãos entre de 3,3 t ha⁻¹, em Adustina 2, na Bahia a 8,3 t ha⁻¹, em cultivo irrigado na Parnaíba, no Piauí. Os autores concluíram que as variedades (Sertanejo, São Vicente, São Francisco, Asa Branca e BR 106) produziram altos rendimentos médios (4,7 a 5,0 t ha⁻¹) e tem forte tendência de se adaptar em condições desfavoráveis e são indicadas para os pequenos e médios produtores. Nas safras 2006/07 a 2008/09 a Embrapa Milho e Sorgo avaliou 22 variedades e 3 híbridos em sistema de cultivo orgânico e seus resultados mostraram que as variedades tem grande potencial como alternativa viável para o sistemas orgânicos de produção, de baixo custo, proporcionando maior autonomia do agricultor (CRUZ et al., 2009).

2.2 Radiação solar sobre o dossel das plantas

A radiação solar é a principal fonte de energia para os processos de biossíntese das plantas, além de exercer influência no crescimento e desenvolvimento vegetal, tornando-se um fator limitante para o rendimento potencial da cultura, quando todas as outras exigências da planta estão em níveis ótimos (OTTMAN; WELCH, 1989). A faixa de radiação solar utilizada pelo aparato fotossintético da planta é denominada de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA), definida como a radiação incidente no espectro solar entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nm, que corresponde a aproximadamente 40 a 50% da radiação incidente na superfície terrestre (ROSENBERG, 1983). De acordo com Fagan et al., (2013), a utilização da RFA pela planta depende de suas folhas em interceptar, extinguir e absorver a radiação que incide sobre as mesmas. A quantidade de radiação fotossinteticamente interceptada por uma cultura varia em função do índice de área foliar e da transmitância atmosférica quando as culturas apresentam índice de área foliar baixo, entretanto para valores elevados do índice de área foliar, a quantidade de energia solar interceptada independe das condições do céu e da qualidade da PAR incidente (HIPPS et al., 1983).

França et al. (1999) utilizaram dados de radiação fotossinteticamente ativa interceptada e de temperatura para ajustar um modelo de crescimento através do monitoramento do acúmulo da biomassa seca em função dessas variáveis meteorológicas. A relação entre a quantidade de energia solar interceptada pela planta e a produção de biomassa define o conceito de eficiência no uso da radiação (EUR), através dessa relação é possível avaliar o acúmulo de biomassa da cultura em diferentes épocas de semeadura, o que se torna possível avaliar a qualidade da época em função da radiação solar (MONTEITH, 1977). A EUR para a cultura do milho pode ser determinada para produção de biomassa e para rendimentos de grãos. Para a cultura do milho a EUR varia entre 3,0 a 4,2 g MJ⁻¹ (KINIRY et al. 1989; CIRILO; ANDRADE, 1994). Ferreira Junior et al., (2014a) encontraram valores variando entre 3,31 e 3,85 g MJ⁻¹ para diferentes tipos de cobertura no solo, na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. As culturas que apresentam o metabolismo C4 apresentam valores semelhantes para eficiência no uso da radiação, porém esses valores podem variar de acordo com o manejo agrônomo da cultura (GOSSE et al., 1986).

A interação entre a radiação solar e o dossel vegetativo das plantas foi baseada em estudos de transmissão de luz através da matéria (Lei de Beer). A Lei de Beer, na realidade, resulta de observações independentes realizada por três autores (Bouguer, Lambert e Beer), em que foi considerada a intensidade da luz transmitida, a espessura da matéria homogênea, por onde passa a radiação e a concentração da solução, mantendo a espessura constante. A relação entre a radiação solar e o dossel vegetativo foi observada por Monsi e Saeki (1953), que notaram maior interceptação da radiação solar em dossel com estrutura foliar horizontal do que na vertical e concluiu então que, a interceptação da radiação no dossel das plantas é análoga a Lei de Beer (HIROSE, 2005). Desta forma, a Lei de Beer aplicada ao dossel vegetativo das plantas é definida pela Equação 1.

$$Rf_T = Rf_I e^{-k \times IAF} \quad (1)$$

em que, Rf_T é a irradiância fotossinteticamente transmitida, Rf_I é a irradiância fotossinteticamente incidente, IAF é o índice de área foliar e k é o coeficiente de extinção da luz.

Os principais parâmetros utilizados nos estudos de interceptação de radiação no dossel vegetativo envolvem índice de área foliar e coeficiente de extinção de luz (k) (SHIBLLES; WEBER, 1966; BISCOE, 1978), e em determinados casos, esses parâmetros definem a produção potencial da cultura (FAGAN et al., 2013). O k é resultante da relação

entre a área sombreada do dossel e a área foliar do mesmo (HIROSE, 2005; MONSI; SAEKI, 2005). De acordo com a revisão realizada por Fangan et al., (2013), o k, em culturas agrícolas, se encontra entre 0,3 a 0,9, de acordo com estágio vegetativo e com as condições ambientais a que a cultura é exposta (Tabela 1).

De acordo com as observações de Monsi e Saeki, (2005) o coeficiente de extinção varia entre 0,3 e 2,0. Mas de forma geral para a vegetação do tipo grama o k varia aproximadamente entre 0,3 e 0,5 e para folha larga varia de 0,7 a 1,0, conforme a conclusão dos autores, o k é bastante variado entre comunidade de plantas diferentes, entretanto plantas da mesma comunidade os valores são quase constante. Vale à pena salientar que em cultivos muito denso, com índice de área foliar muito alto, o k pode ser inversamente proporcional a absorptância.

Tabela 1- Valores de coeficiente de extinção de luz de espécies agrícolas cultiváveis.

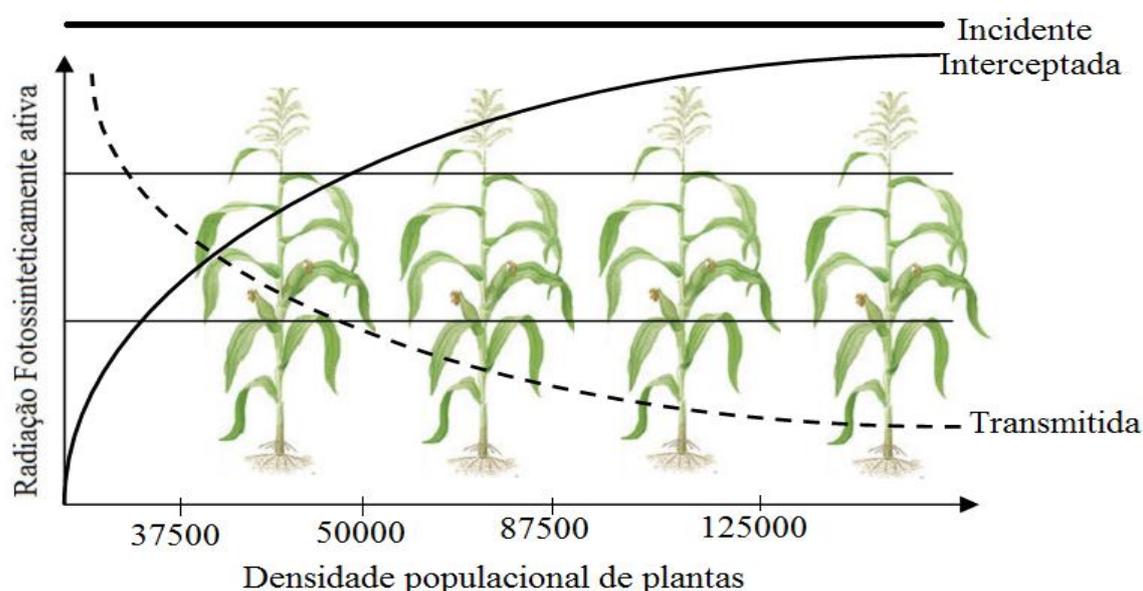
Espécies	Coeficiente de extinção (k)	Fonte
<i>Triticum aestivum</i>	0,38 (depois da antese)	Yunusa et al. (1993)
	0,63-0,76 (algumas variedades, depois da antese)	Yunusa et al. (1993)
	0,46 (depois do surgimento da folha bandeira)	Thorne et al. (1988)
	0,34-0,51 (3º nó visível)	Whaley et al. (2000)
	0,33-0,50 (surgimento da folha bandeira)	Whaley et al. (2000)
	0,32-0,45 (antese)	Whaley et al. (2000)
<i>Zea mays</i>	0,66-1,0 (incluindo variedades com disposição de folhas horizontais)	Hatfield e Carlson (1979)
	0,47 (35 cm de espaçamento em linha)	Flénet et al. (1996)
	0,34 (100 cm)	Flénet et al. (1996)
	0,64-0,83 (dados simulados em campo)	Maddonni et al. (2001)
<i>Glycine max</i>	0,56-0,68 (estresse hídrico)	Sivakumar e Shaw (1979)
	0,58-1,0 (irrigado)	Sivakumar e Shaw (1979)
	0,83 (25 cm de espaçamento em linha)	Walcott et al. (1984)
	0,62 (75cm)	Walcott et al. (1984)
	0,52 (35cm) - 0,32 (100 cm)	Flénet et al. (1996)
<i>Helianthus annuus</i>	0,83 (hemisfério norte)	Rachildi et al. (1993)
	0,89 (hemisfério sul)	Bange et al. (1997)
<i>Pisum sativum</i>	0,55-0,75 (desfolhadas)	Heath e Hebblethwaill(1985)
	0,33-0,49(folhosas)	Heath e Hebblethwaill(1985)

Fonte: Fagan et al., (2013)

A radiação solar interceptada pelo o dossel das plantas pode ser absorvida, transmitida e refletida em frações variadas, a quantidade de cada componente depende do ângulo de incidência dos raios solares e dos parâmetros baseado na Lei de Beer (k e IAF), devido às características estruturais das plantas. As características do dossel estão relacionadas com a disposição espacial das folhas, ângulo de inserção foliar, IAF e propriedades óticas da vegetação (MACHADO et al., 1985). A fração de radiação transmitida decresce

exponencialmente em função do aumento da densidade de plantas, enquanto que a fração de radiação interceptada pelas plantas aumenta proporcionalmente com o aumento do índice de área foliar, considerando a radiação incidente constante sobre a superfície das plantas, conforme mostra a Figura 1. De acordo com Machado et al. (1985) o coeficiente de transmissão de luz é função de vários fatores, entre eles o tamanho, a estrutura e a geometria das folhas.

Figura 1- Comportamento da radiação fotossinteticamente ativa interceptada e transmitida, em função do aumento populacional de plantas.



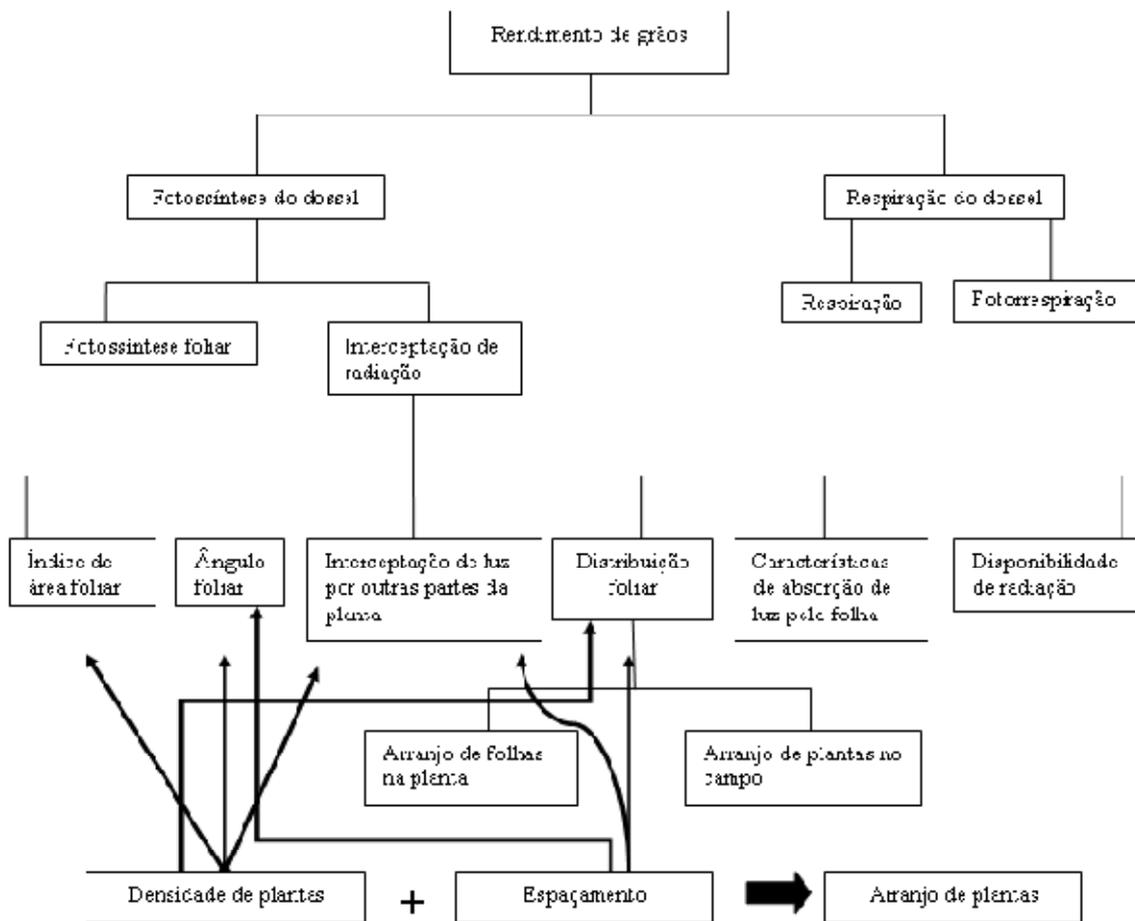
Fonte: Autor (2015), adaptada de Fangan et al., (2013).

2.3 Manejo populacional e demanda hídrica do milho

A produção dos carboidratos e o rendimento agrícola das plantas dependem da energia acumulada na fase fotoquímica da fotossíntese através da interceptação da RFA no dossel da cultura (STEWART et al., 2003). Muitos estudos (KASPERBAUER; KARLEN, 1994; JOHNSON et al., 1998; BARBIERI et al., 2000; ARGENTA et al., 2001a; MADDONNI; OTEGUI; CIRILO, 2001; AMARAL FILHO et al., 2005; RESENDE et al., 2010) foram realizados com arranjos espaciais de plantas que resultam em diferentes espaçamentos e densidades populacionais, para possibilitar o melhor aproveitamento da radiação solar, da água e dos nutrientes, com vistas a uma maior produtividade das culturas agrícolas (MUNDSTOCK, 1977; LOMMIS; AMTHOR, 1999; ARGENTA et al., 2001a). O propósito de modificar o arranjo de plantas seria para possibilitar maior interceptação da radiação solar

incidente no período menor de tempo, e com isso aumentar o rendimento de grãos (KUNZ, et al., 2007). Pesquisas têm mostrado uma relação entre o acúmulo de biomassa seca e a energia fotossinteticamente ativa interceptada ao longo do ciclo de muitas espécies vegetais (FRANÇA et al., 1999; DIDONET et al., 2002; KUNZ et al., 2007; MARCHÃO et al., 2010; SANGOI et al., 2011). De acordo com o fluxograma (Figura 2), proposto por Gardner et al. (1985), diferentes fatores, em conjunto, afetam o rendimento final de grãos.

Figura 2- Fluxograma dos fatores que afetam o rendimento de grãos do milho.

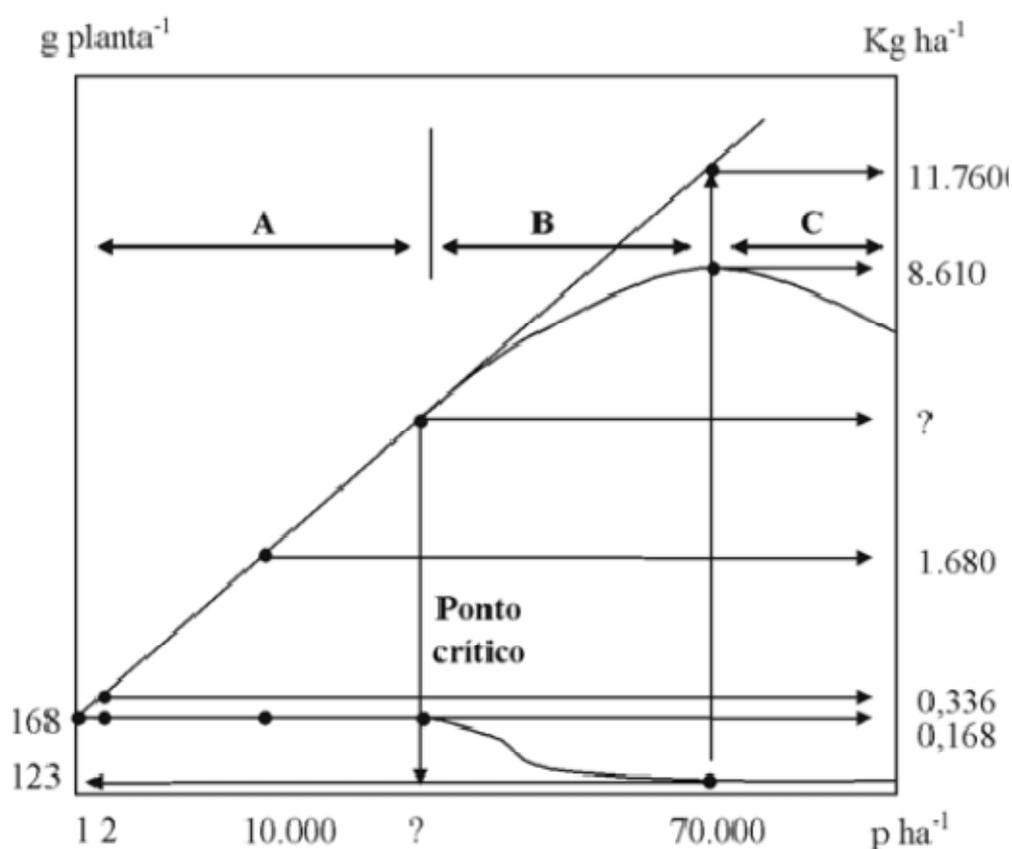


Fonte: Fangan et al., (2013) adaptado de Gardner et al., (1985).

O rendimento de grãos é dependente da fotossíntese e da respiração do dossel. Por sua vez, a produção de carboidratos que será utilizada para o acúmulo de biomassa é em função da fotossíntese e da interceptação da radiação solar no dossel. Enfim, as características do dossel (índice de área foliar, ângulo da folha, distribuição das folhas, interceptação da luz por outras partes da planta, entre outras) são dependentes da combinação da densidade e do espaçamento entre as plantas, o que define a quantidade de radiação incidente será interceptado pelo dossel vegetativo (FANGAN et al., 2013).

A produção de grãos tende a aumentar com a elevação da população de plantas até a mesma atingir a população ótima, após a densidade ótima, o aumento da população resultará no decréscimo de rendimento de grãos (Figura 3). Isso ocorre devido ao aumento de plantas estéreis, decréscimo do número de grãos por espiga e o menor enchimento de grãos (TETIO-KAGHO;GARDNER, 1988; PEREIRA, 1991; HASHEMI; HERBERT, 1992; SILVA et al.,1999; MADDONNI; OTEGUI; CIRILO, 2001; SANGOI et al.,2009).

Figura 3 - Produção por unidade de planta e por unidade de área, em função do aumento populacional de planta.



Fonte: Dourado Neto et al. (2001)

O aumento da densidade populacional é uma das opções de manejo mais eficiente para aumentar a interceptação da radiação solar pela cultura do milho. Essa prática agrícola modifica a distribuição e o ângulo das folhas para a planta aproveitar melhor a radiação solar incidente, já que o milho não apresenta perfilhamento para compensar os espaços vazios, como outras plantas da família *Poaceae*, entretanto o grau de competições intra-específico causado por diferentes densidades de plantas pode provocar uma redução no rendimento da cultura (DEMÉTRIO et al, 2008).

De acordo com Sangoi et al (2001a), a população ideal para alcançar altos níveis de rendimento de grãos para o milho varia entre 30 a 90 mil plantas por hectare, dependendo das condições do meio (disponibilidade hídrica, fertilidade do solo) e do manejo da cultura (ciclo da cultivar, época de semeadura e espaçamento entre linha). Em cultivos com adensamento superior a sua capacidade produtiva há uma série de consequência na formação da espiga, pois pode provocar esterilidade na planta. Sangoi et al. (2011) realizaram estudos com quatro densidades de plantas de milho (30.000; 50.000; 70.000; 90.000) e três espaçamentos entre linha (0,4; 0,7; 1,0 m), no Município de Lages-SC, durante o período primavera/verão dos anos agrícolas 2007/2008 e 2008/2009, os resultados mostraram aumento na produtividade de grãos de 9,7 a 11,7 Mg ha⁻¹, quando a densidade de plantas aumento de 30 a 90 mil plantas por hectare. Entretanto, a densidade que determina o máximo rendimento de grãos é muito variada. Para Argenta, Silva, Sangoi (2001b), a população de milho para a máxima produção econômica variou entre 40 a 90 mil plantas por hectare.

Penariol et al. (2003) avaliaram o desempenho agrônômico de cultivares de milho, que possuem características contrastantes, na região de Jaboticabal- SP, e observaram que o maior rendimento de grãos para um híbrido simples modificado (AG-9010) foi atingindo pela população de 80 mil plantas por hectare, enquanto, a maior produtividade de uma variedade com alto valor protéico (BR473), foi alcançada por 70 mil plantas por hectare.

Merotto Júnior, Almeida e Fuchs (1997) estudaram resposta para rendimento de grãos de milho em função da densidade de plantas e espaçamento entrelinhas e mostraram aumento linear na produção de grãos de 7,5 para 10,2 Mg ha⁻¹, quando a densidade de planta aumentou de 37 para 81 mil plantas por hectare, enquanto que o espaçamento entrelinhas não afetou o rendimento e os componentes do rendimento. Entretanto, SANGOI et al. (2001c) pesquisando o efeito da redução de espaçamento entrelinhas no rendimento de grãos, em diferentes épocas de semeadura e cultivares de milho, encontraram que a redução do espaçamento de 1,0 para 0,5 m aumento linearmente o rendimento de grãos. Em outro trabalho, SANGOI et al., (2005) avaliaram o efeito de dois híbridos contrastantes, sendo um intolerante ao adensamento (Ag 303) e outro adaptado a altas densidades (Speed) e cinco densidades de plantas (25.000, 50.000, 75.000, 100.000 e 125.000 pl ha⁻¹) e mostraram que o híbrido adaptado foi mais responsivo ao incremento na população de 25.000 até 100.000 pl ha⁻¹ devido a sua maior sincronia entre florescimento masculino e feminino. Enfim a ótima densidade populacional de plantas é dependente do genótipo, manejo agrônômico e do ambiente.

A procura de produtividades elevadas, o rendimento da cultura do milho em função do aumento da densidade de plantas, os fitomelhoristas passaram a dar mais ênfase nas pesquisas

que envolvem arquitetura foliar, baseada nas hipóteses de que as plantas de menor porte, com a inclinação mais vertical das folhas (folhas eretas), menor duração do período pendramento e espigamento, permitiriam um maior adensamento, resultando em maior capacidade fotossintética e maior rendimento por área (ALMEIDA et al., 2000). Os híbridos precoces, geralmente, exigem densidade populacional mais elevada de que híbridos tardios para alcançar o rendimento máximo, isso ocorre, pois híbrido precoce necessita de elevada população de plantas para aumentar o índice de área foliar para promover maior absorção da RFA incidente (TOLLENAAR, 1992; SANGOI et al., 2001b; MARCHÃO & BRASIL, 2007).

De acordo com Argenta; Silva e Sangoi (2001b), a melhor adaptação dos híbridos modernos ao adensamento pode ser atribuída a modificações genéticas, morfológicas e fisiológicas, tais como o decréscimo no tamanho do pendão, número de plantas estéreis, taxa de senescência foliar durante o enchimento de grãos, intervalo entre pendramento e espigamento, estatura e número de folhas, acamamento de colmo e raízes e no ângulo de inserção de folhas com o colmo. Enquanto isso, os híbridos duplos, da década de 70 e 80, apresentavam arquitetura foliar aberta e grande número e comprimento de folhas, além de serem menos produtivos em função de elevadas densidades de plantas.

Resultados encontrados por Sangoi et al. (2002b) mostraram que híbridos com característica de híbridos moderno favoreceu a interceptação de luz, minimizando o sombreamento das folhas inferiores, o que aumentou a disponibilidade de carboidratos durante a floração e garantiu o desenvolvimento de grãos em cultivos adensados. Dourado Neto et al. (2003) avaliando o efeito da população de plantas (30.000; 60.000 e 90.000 plantas por hectare), sob dois espaçamentos (0,40 e 0,80 m), sobre o rendimento de grãos de três genótipos de milho com arquiteturas foliares aberta (AG 1051), semi-ereta (AG 7575) e ereta (DKB 911), em Piracicaba-SP, observaram um incremento no rendimento de grãos com aumento de 60 para 90 mil plantas por hectare, apenas para o genótipo de arquitetura ereta, enquanto que o genótipo de arquitetura aberta provocou redução no rendimento em função do aumento da densidade de plantas.

De acordo com, Loomis e Connors, 1992 e Marchão (2004), a disponibilidade hídrica é, provavelmente, a exigência mais importante da planta que afeta a escolha da população ótima. O rendimento de grãos é limitado para a cultura do milho em função da disponibilidade hídrica do solo nos períodos críticos, onde a demanda hídrica é maior, devido à maior quantidade de água transpirada pelo dossel. O aumento na densidade populacional de plantas aumenta o índice de área foliar e com isso, eleva o consumo de água (MARCHÃO, 2004).

Mundstock (1978), pesquisando o efeito de espaçamento e densidade de planta, concluíram que os espaçamentos não afetaram o rendimento de grãos no primeiro experimento devido ao estresse hídrico ocorrido no período de polinização.

As plantas submetidas ao estresse hídrico comprometem os processos metabólicos que serão necessários para o crescimento e desenvolvimento da cultura. O estresse hídrico limita a produtividade do milho, pela redução na eficiência com que a radiação fotossinteticamente ativa é absorvida devido à menor área foliar, decorrente do enrolamento foliar nesses períodos (EARL; DAVIS, 2003; MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005). Kunz et al. (2007) trabalhando com a cultura do milho em diferentes manejo de solo, arranjos de plantas e disponibilidade hídrica, mostraram, redução de até 40% no índice de área foliar, em cultivos sequeiros, quando comparado ao cultivo irrigado e atribuiu a menor taxa de expansão celular e ao intenso processo de senescência foliar quando a cultura foi submetida ao déficit hídrico.

A redução na disponibilidade hídrica afeta negativamente a evolução do índice de área foliar e o acúmulo de matéria seca (FRANÇA et al., 1999). De acordo com Rosenberg (1983) a cobertura do solo pelo índice de área foliar determina a perda de água no solo (evaporação) e quantidade de água transpirada pelas folhas (transpiração). Confirmando essa informação, Brum et al (1972) encontraram correlação entre o índice de área foliar e a proporção de água perdida por transpiração, para as culturas de soja e sorgo.

Em regiões que possuem baixa precipitação pluvial associada com a irregularidade sazonal das chuvas, os rendimentos da cultura podem alcançar níveis mais elevados através do aumento da eficiência no uso da água (EUA), por meio de manejo ótimo e adequada escolha da época de semeadura e densidade populacional de plantas (NYAKUDYA; STROOSNIJDER, 2014). A eficiência no uso da água é a razão entre a biomassa acumulada pela planta e a água consumida durante seu ciclo, a mesma pode estimada por meio da regressão linear, representada pela inclinação da reta (GRASSINI et al., 2009). A maior EUA pode ser atingida pelo o ajuste na densidade populacional de plantas, pois essa pratica agrônômica provoca melhor cobertura do solo e apresenta menores perdas por evaporação, e nutrientes devido à melhor distribuição das plantas (BULLOCK et al, 1988; LAUER, 1994).

A necessidade de água de uma mesma cultivar de milho varia em função dos genótipos (ciclo, área foliar, altura e sistema radicular), do tipo de solo, do manejo agrícola e das condições meteorológicas de cada local e das épocas de semeadura (FRANKE; DORFMAN, 1998). De acordo com Doorenbos e Kassan (1979) a necessidade hídrica do milho durante o ciclo da cultura varia de 500 a 800 mm. Cardoso (1995) apresenta valores de evapotranspiração da cultura variando de 559,2 mm e 527,2 mm no ciclo, para épocas de

semeadura em outubro e novembro, respectivamente. Entretanto, Fancelli e Dourado Neto (2004) cita valor mínimo de 350 mm para a cultura desenvolver e se adaptar as condições edafoclimáticas da região, bem próximo do valor mínimo (373 mm) citado por Jensen (1973), que pode variar até 640 mm.

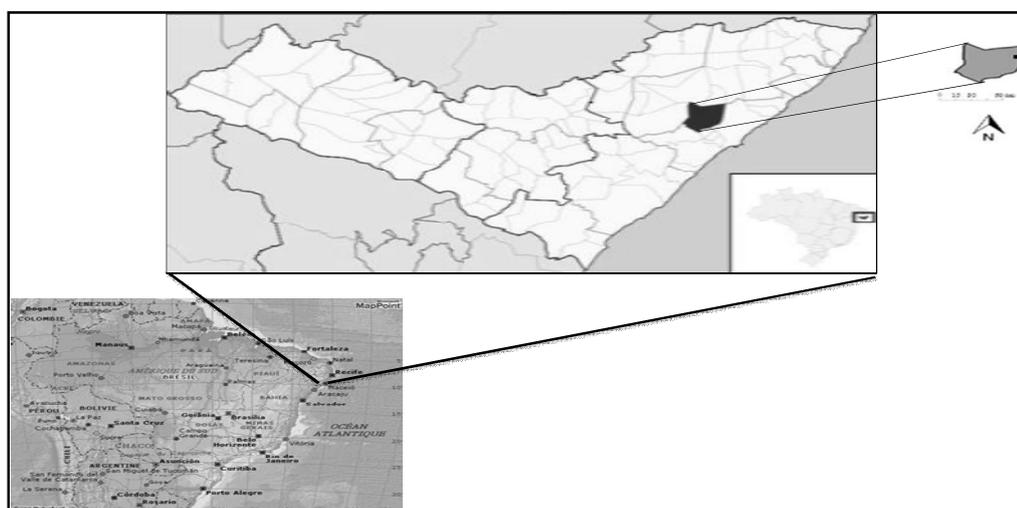
Gardiol, Serio e Maggiora (2001) trabalhando com métodos de evapotranspiração da cultura do milho, em Buenos Aires, mostraram uma diferença na evapotranspiração acumulada medida entre diferentes densidades (22000 e 91000 plantas por hectare) de 165 mm e comparou três modelos de evapotranspiração potencial e o que mais se aproximou dos resultados reais foi o modelo proposto, pelos mesmos autores, de E+T. Li et al. (2013) corroboram com os autores anterior e afirmam, que as praticas de manejo (densidades de plantas) modifica a fração de evaporação e transpiração. Os métodos de estimativa de evapotranspiração que melhor se ajustam a diferentes densidades de plantas são aqueles que levam em consideração o índice de área foliar, como Penmann-Monteith (1965), modelo de Shuttleworth; Wallace (1985) e o modelo proposto por Gardiol et al. (2003). Entretanto, o método de Penmann-Monteith é ineficiente para semeadura pouco densa, pois o método considera culturas com cobertura uniforme, tratando o dossel como uma única superfície ou uma *õbig-leafö*. De acordo com Farahani e Bausch (1995) quando o índice de área foliar foi menor do que 2, o modelo Penmann-Monteith apresentou baixo desempenho devido à negligência da evaporação do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e descrição do experimento

O estudo foi conduzido na unidade experimental do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), região de Rio Largo-AL (09°28'02"S; 35°49'43"W; 127 m) numa área de 2.736 m² (Figura 4). O solo da área é classificado como Latossolo Amarelo Coeso Argisólico de textura médio-argilosa, e declividade inferior a 3%. As características físico-hídricas do solo são: conteúdo de água na capacidade de campo (cc = 0,2445 m³ m⁻³) e ponto de murcha permanente (pm = 0,1475 m³ m⁻³), para profundidade de 0 a 60 cm; densidade do solo (1,5 Mg m⁻³); porosidade total do solo (0,423 m³ m⁻³) e velocidade de infiltração básica de 52 mm h⁻¹. O clima da região é caracterizado, pela classificação de Thornthwaite & Mather, como úmido, megatérmico (quente), com deficiência de água moderada no verão e grande excesso de água no inverno. A precipitação pluvial média anual é 1.818 mm, com mínima (41 mm) em janeiro e máxima (294 mm) em julho. A temperatura do ar varia de 19,3 °C em agosto a 31,7 °C em janeiro, com média anual de 25,4 °C e umidade relativa do ar média mensal acima de 70% (SOUZA et al., 2005). Maiores detalhamento sobre as médias climatológicas anuais (1972-2010) de precipitação pluvial, temperatura do ar média, umidade relativa média e da fração de nebulosidade, estão descritos em Ferreira Júnior et al. (2014b).

Figura 4- Localização da pesquisa experimental, mostrando o estado de Alagoas e o município do Rio Largo e Centro de Ciências Agrárias (CECA).

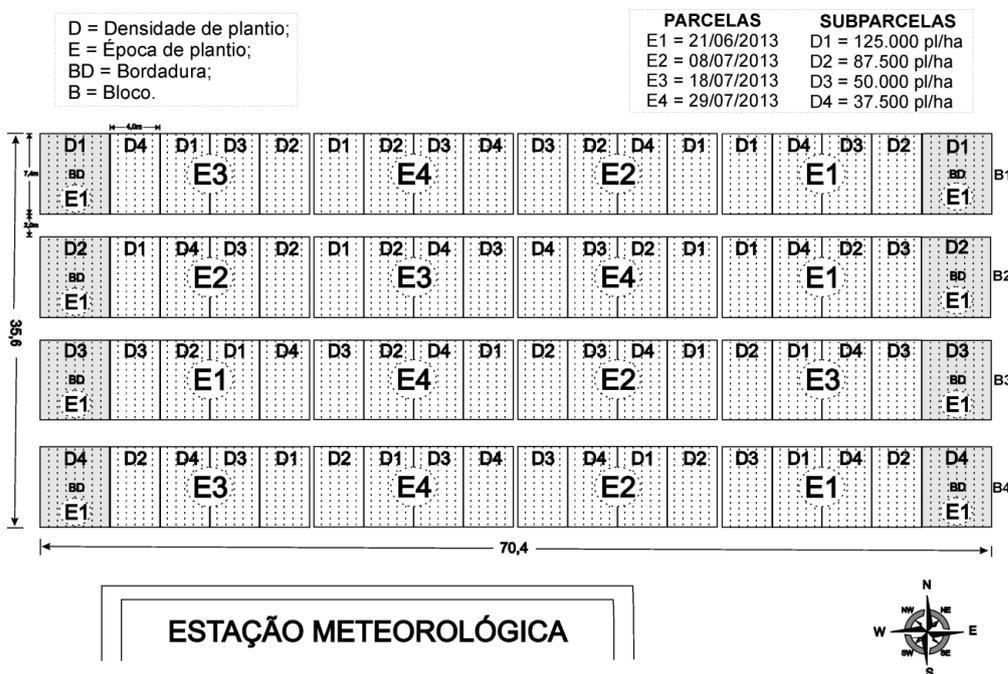


Fonte: Autor (2015) adaptado de Ferreira Júnior (2013)

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O campo experimental foi composto por quatro épocas de semeadura (28/06/13 ó E1, 08/07/13 ó E2, 18/07/13 ó E3 e 28/07/13 - E4) e quatro densidades populacional de plantas de milho (125.000 ó D1; 87.500 ó D2; 50.000 ó D3 e 37.500 ó D4) plantas por hectare (pl ha⁻¹). O delineamento experimental foi blocos casualizados no esquema de parcelas subdivida no espaço, de natureza mista, com dezesseis tratamentos, resultantes da combinação de quatro épocas de semeadura (E1, E2, E3 e E4) e quatro densidades de plantas (D1, D2, D3 e D4), sendo que os tratamentos da época de semeio foram colocados nas parcelas e os tratamentos da densidade de plantas nas subparcelas, e quatro repetições (Figura 5). As subparcelas foram constituídas de cinco linhas com sete metros. Para eliminar o efeito bordadura entre os tratamentos, as duas linhas da extremidade de cada parcela e as quatro linhas na extremidade de cada bloco foram consideradas bordaduras.

Figura 5- Croqui do experimento



Fonte: Autor (2015)

As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa SISVAR submetendo-se os dados a análise de variância, a 5% de probabilidade e posteriormente para as variáveis quantitativa foram realizadas as regressões e para a variável qualitativa comparação de média pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.3 Implantação e condução do experimento

O manejo da área procedeu a cerca de três meses antes do plantio com a aplicação de um dessecante (glifosato) para eliminar a vegetação anterior e uma semana antes da semeadura foram abertos os sulcos manualmente na profundidade de 10 cm, posteriormente foi realizada a adubação de fundação. De acordo com a análise química do solo, a recomendação de adubação de fundação consistiu em 30, 80 e 60 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, e K₂O respectivamente. As fontes de adubos utilizadas foram sulfato de amônia, superfosfato simples e cloreto de potássio. O adubo foi aplicado no fundo do sulco e logo em seguida coberto manualmente (Figura 6).

Figura 6- Preparo do solo, adubação e plantio. A) Plantas daninha dessecada; B) Abertura dos sulcos; C) Adubação de fundação no fundo do sulco; D) Cobertura do adubo; E) Gabarito das sementes; F) Cobertura das sementes.



Fonte: Autor (2015)

A variedade utilizada foi a AL Bandeirantes desenvolvidas pelo Departamento de Sementes, Mudas e Matrizes da CATI, lançada em 2001 e tem as seguintes características: ciclo semi-precoce cerca de 130 a 140 dias, épocas de florescimento de 62 a 63 dias após a semeadura (DAS), altura média de 2,30 m, resistência ao acamamento, empalhamento ótimo, produtividade média de 7 Mg ha⁻¹, recomendada para solos de baixa a alta fertilidade.

A semeadura foi realizada nos dias 28 de junho, 8 de julho, 18 de julho e 29 de julho de 2013 para a primeira, segunda, terceira e quarta época, no espaçamento entrelinhas de 0,8 m, respectivamente. Foram utilizadas três sementes para cada espaçamento entre plantas, semeadas com auxílio de gabaritos de PVC marcados de acordo com cada densidade e

cobertas com aproximadamente 4 cm de solo. Após a emergência das plântulas foi realizado desbaste quando as plantas apresentavam três folhas totalmente expandidas (15 DAS).

A adubação de cobertura foi realizada aos 20 dias após a semeadura (DAS) de cada época, quando as plantas apresentaram quatro folhas expandidas (V4), conforme escala proposta por Ritchie et al. (1993). A fonte de N utilizada foi uréia para aplicação de 120 Kg de N ha⁻¹, conforme a utilizado por Lyra et al. (2014) através de estudo realizado na mesma região no ano de 2009. Após a aplicação do adubo o mesmo foi coberto para evitar perdas de N por volatilização. Foram aplicados micronutrientes parcelado em duas vezes, nos estádios de quatro e oito folhas expandida (V4 e V8), sendo que na primeira parcela foi aplicado 0,4 L ha⁻¹ de CHELAL Zn + 1,0 L ha⁻¹ de LANDAMINE BMo e na segunda parcela foi aplicado 0,6 ha⁻¹ de CHELAL Zn + 1,0 L ha⁻¹ de LANDAMINE BMo + 0,1 L ha⁻¹ de CHELAL Cu e mais 1,0 kg ha⁻¹ KAPPA V (N, P, K, B e Fe quelatado).

O controle de ervas daninha foi realizado com herbicida de pré-emergência com a mistura de 400 mL Atrazina 500 scNortox® + 100 mL de Aminamar (2,4 D) para calda de 20 L, as aplicações foram realizadas com pulverizador costal, nos dias 02 e 15 de julho para a primeira e segunda época, respectivamente, e 30 de julho para a terceira e quarta época. Além do controle químico, foram realizadas também algumas capinas manuais para evitar concorrência entre a cultura e as ervas daninhas no decorrer do experimento. Para o controle da lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*) foi utilizado o inseticida Capataz BR® (Clopirifós) 0,5 L ha⁻¹ para uma calda de 200 L, pulverizado com uma bomba costal (Figura 7). As aplicações tiveram início no dia 23 de julho em todas as parcelas plantadas e foi aplicado sempre que foi observada a praga no campo respeitando o intervalo entre aplicações de 10 dias até o dia 19 de setembro.

Figura 7- Controle da lagarta do cartucho (*Spodoptera Frugiperda*). Aplicação do inseticida (A); Lagartas mortas após a aplicação (B).



Fonte: Autor (2015)

O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento com fitas gotejadoras de 16 mm, espaçadas de 0,8 m. O sistema de irrigação foi dimensionado utilizando duas bombas em série, uma caixa d'água de 10 m³, tubulações de PVC de 20 e fitas gotejadoras com gotejadores espaçados a 0,2 m e vazão nominal de 1,6 L h⁻¹. O manejo da irrigação iniciou a partir do dia 19 de setembro de 2013, com lâminas de irrigação de 20 mm, para manter um nível de água disponível no solo acima de 55% na zona de raiz, necessário para obter condições potenciais de crescimento (DOORENBOS; KASSAM, 1979). A quantidade de água aplicada foi com base na evapotranspiração de referência da estação agrometeorológica.

3.4 Análises de crescimento e desenvolvimento da planta

As análises de crescimento foram realizadas semanalmente a partir de doze plantas marcadas por parcela, sorteadas logo após a emergência. As variáveis de crescimento analisadas foram: Altura de planta (AP), índice de área foliar (IAF), diâmetro do colmo (DC) e biomassa seca (BS). As avaliações para determinar a biomassa seca foram destrutivas e consistiu na coleta de oito plantas por subparcela. Esse material foi separado em: folhas, colmos, pendões e espigas. Depois de separado, o material vegetal foi identificado e levado a estufa a 65 °C com ventilação forçada até que a massa de todas as partes da planta apresentasse valor constante, conforme metodologia de (PEREIRA; MACHADO, 1987; BENINCASA, 1988) (Figura 8).

Figura 8. Coleta das plantas para determinação da biomassa seca. A) Plantas inteiras; B) Folhas separadas; C) colmos separados; D) Inflorescência masculina e feminina; E) Amostras na estufa; F) Pesagem das amostras.



Fonte: Autor (2015)

A área foliar foi calculada pela metodologia de Francis, Rutger e Palmer (1969). A constante desta equação foi determinada por Montgomery (1911) que encontrou o fator de ajuste de 0,75 para esta equação da área foliar. Mokhtarpour et al. (2010) testou vários valores e a melhor estimativa para a constante foi 0,754. Para a região de estudo também foi encontrado o valor de 0,75 (MARTINS, 2002). O IAF foi calculado pela a relação entre a área foliar e o espaço ocupado em cada tratamento (BEADLE, 1993).

Os estádios fenológicos foram observados em função da época de semeio uma vez por dia e classificados de acordo Ritche et al. (1993), em que os estádios são separados em vegetativo (VE, Emergência; V1, 1ª folha expandida; V2, 2ª folha expandida, Vn, enésima folha expandida e VT, pendoamento) e reprodutivo (R1, florescimento; R2, grão leitoso, R3, grão pastoso; R4, grão farináceo; R5, grão farináceo duro e R6, Maturidade fisiológica). Para facilitar a identificação na fase vegetativa foram marcadas as folhas com o barbante de algodão observando-se da emergência (VE) até a maturidade fisiológica (R6). Todas as variáveis foram analisadas em função dos graus-dia acumulados (GD), determinados a partir da Equação 2. A temperatura-base utilizada foi 10 °C conforme a metodologia de Belato e Matzenauer (1986), porém alguns autores (YAN; HUNT, 1999; WHITE, 2001; STRESCK et al. 2009) relataram a temperatura base para o milho de 8 °C. Entretanto Lozada e Angelocci (1999) comparou vários valores para cada subperíodo do ciclo e constatou que 10 °C foi a temperatura base mais adequada.

$$GDA = \sum_{i=1}^n (T_{m,i} - T_b) \quad (2)$$

em que: GDA são os graus-dia acumulados (GD); T_m (°C) é a temperatura do ar média diária do dia i (°C); e T_b (°C) é a temperatura basal.

O modelo logístico foi utilizado para descrever o acúmulo da biomassa aérea e da altura das plantas (LYRA et al., 2008; LYRA et al., 2010; BATISTA et al., 2013) Equação 3.

$$w = \frac{w_f}{1 + (w_f/w_0 - 1)\exp(-r \sum GDA)} \quad (3)$$

em que: w (cm) é a variável de crescimento (altura de planta); w_0 e w_f (cm) correspondem, ao altura inicial e final do ciclo da cultura, respectivamente; r ($\text{cm cm}^{-1}\text{°C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) é a taxa

máxima de crescimento relativo; e $\hat{U}GDA$ representa o somatório de energia térmica disponível no período de crescimento;

O modelo log normal de três parâmetros foi ajustado à variável IAF em função de GDA (SOUZA et al., 2012; FERREIRA JUNIOR et al., 2012; FERREIRA JUNIOR et al., 2014b) Equação 4 :

$$IAF = a_1 \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln(\sum GDA/a_2)}{a_3} \right)^2 \right] \quad (4)$$

em que: a_1 - amplitude de y (IAF), a_2 - valor de x (GDA) no qual y é máximo e a_3 - grau de decaimento da variável y .

O diâmetro do colmo foi relacionado com GDA e foi ajustada em função do modelo sigmoidal de Boltzmann (FERREIRA JUNIOR et al., 2014b) Equação 5.

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(\sum GDA - X_0)/dx}} + A_2 \quad (5)$$

em que, A_1 e A_2 correspondem, ao valor inicial e final do ciclo da cultura (y), GDA é a variável independente, X_0 é o ponto de inflexão, ou seja, valor da ordenada x (GDA) que corresponde ao valor médio de y ($X_0, (A_1 + A_2)/2$), e o dx é o coeficiente de ajuste, ou seja, indica o grau de incremento de y em função do aumento de GDA.

3.5 Medidas ambientais e hídricas do solo

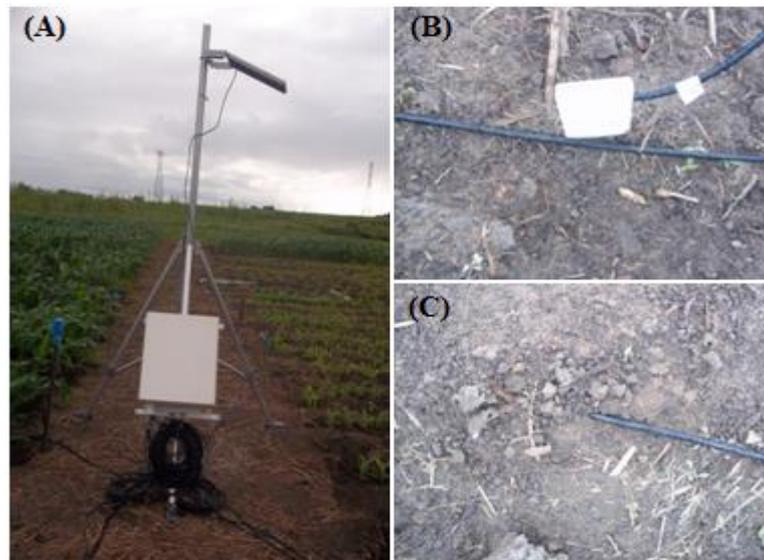
Os dados meteorológicos foram obtidos da estação agrometeorológica do Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (LARAS), existente na área do experimento. A temperatura e umidade relativa do ar foram registradas por um termohigrômetro (HMP45C, Campbell Scientific, Logan, Utah) instalado a 2,0 m acima da superfície do solo. A precipitação pluvial foi obtida através de um pluviômetro (TB3, Hydrological Services PTY. LTD., Sydney, Austrália) instalado a 1,5 m da superfície do solo. A irradiância solar global ($R_g, W m^{-2}$) foi monitorada por um piranômetro (Eppley, modelo 848, B&W) na faixa espectral de 305 a 2800 nm. A velocidade do vento foi medida através de um anemômetro (Modelo RM Young, Campbell Scientific). Com exceção do piranômetro que armazenava média a cada 5 minutos, as demais medidas efetuavam medidas a cada 10 segundos e

armazenava médias a cada 10 minutos, através de um sistema de aquisição automática de dados. A transmitância atmosférica ou índice de claridade (K_t) foi calculado pela relação entre a irradiação solar global (H_g) e a irradiação solar no topo da atmosfera (H_a), e o resultado foi classificado conforme (IQBAL, 1983), em que $K_t \times 0,7$ considera céu claro, K_t entre 0,3 e 0,7 céu parcialmente nublado e quando K_t inferior 0,3 o dia considera céu nublado. R_a foi calculado de acordo com a metodologia de ALLEN et al., (1998).

3.5.1 Medidas hídricas do solo

Para quantificação do conteúdo de água no solo utilizou-se o método eletromagnético (Time Domain Reflectometry - TDR) (ARSOY et al., 2013). Para isso foi instalada um sensor de duas hastes de aço, composta de um dispositivo elétrico, que transmite uma onda, em que a velocidade do pulso é em função do conteúdo de água no solo (EVETT, 2003; SOUZA et al., 2006). O sistema elétrico funciona a partir de corrente contínua, fornecida por uma bateria alimentada por um painel solar. Os sensores medem 0,30 m de comprimento e foram posicionadas verticalmente no solo, próximo as plantas e dentro das fileiras centrais, nas profundidades de 0,0 m a 0,30 m e 0,30 m a 0,60 m de profundidade em conformidade com a metodologia de Rocha et al. (2014). Foram sorteadas duas subparcelas por tratamento para a instalação das sondas de medição do TDR. Deste modo utilizou 12 sensores de umidade e foram distribuídos nos seguintes tratamentos na E1D1 (0 a 30 e 30 a 60 cm), E1D4 (0 a 30 cm), E2D3 (0 a 30 e 30 a 60 cm), E2D1 (0 a 30 cm), E3D2 (0 a 30 e 30 a 60 cm), E3D1 (0 a 30 cm), E4D1 (0 a 30 e 30 a 60 cm) e na E4D2 (0 a 30 cm) Figura 9.

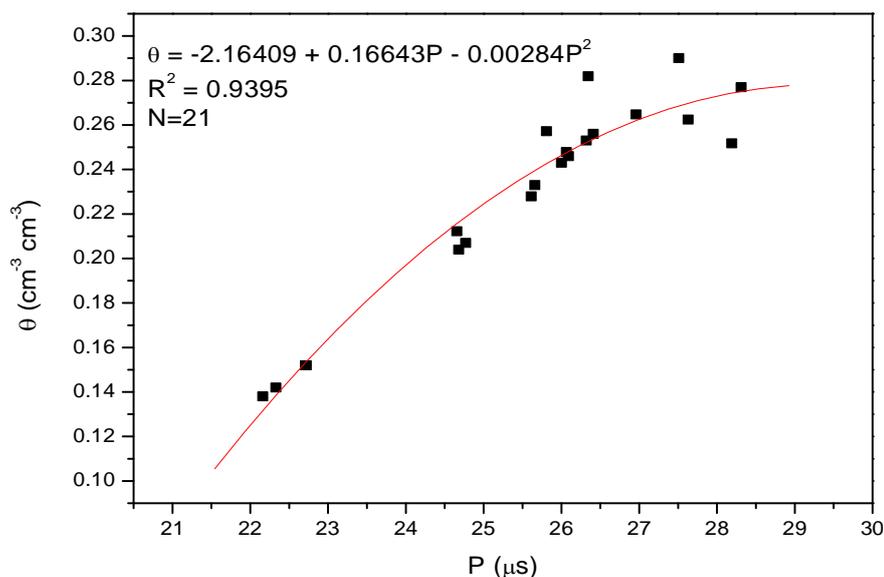
Figura 9- Sonda de umidade de solo acoplado com o sistema de aquisição de dados e painel solar.
A) Caixa do datalogger e painel solar; B) Sonda enterrada de 0 a 30 cm; C) Sonda enterrada de 30 a 60 cm.



Fonte: Autor (2015)

Para converter a permissividade dielétrica do solo através da leitura do período (P), realizada pelo TDR, para conteúdo volumétrico de água no solo foi utilizada uma calibração adequada para propriedades específica desse tipo de solo. Os parâmetros da equação foi ajustada pelo modelo polinomial do segundo grau (CAMPBELL, 2004) (Figura 10).

Figura 10- Curva de calibração do TDR, relacionando umidade volumétrica (θ) e período (P) para o solo do experimento na profundidade de 0 a 0,60 m.



Fonte: Souza, (2013)¹

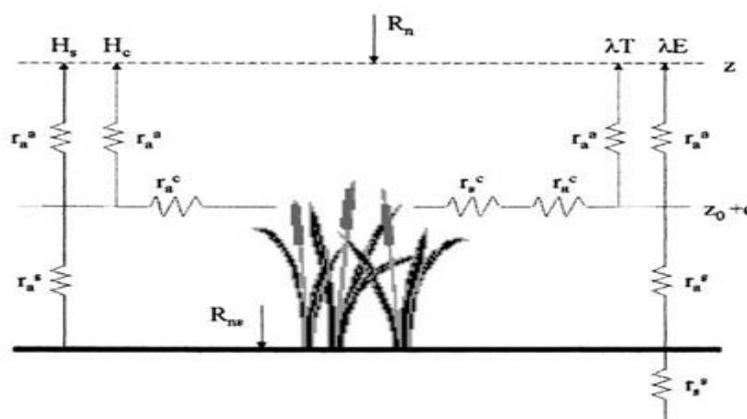
¹Souza, J. L. (Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar, UFAL ó Campus Maceió. (Comunicação Pessoal, 2013)

O armazenamento de água no solo foi multiplicado pelo a profundidade do sensor de umidade e transformado em lâmina de água. A capacidade de água disponível (CAD) foi calculada pela diferença das umidades volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}), e do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), multiplicada pela profundidade efetiva do sistema radicular (0,30 m), desta forma os cálculos do armazenamento de água no solo foi realizado para profundidade de 0,00 a 0,30 m para os tratamentos sorteados que foram acompanhados do início até o final do ciclo cultura. A água facilmente disponível (AFD) foi considerada levando em consideração o limite de 55% da capacidade de água disponível (ALLEN et al., 1998).

3.5.2 Evapotranspiração potencial

A evapotranspiração potencial (ET) foi calculada pelo modelo proposto por Gardiol; Serio e Maggiora (2003) que consiste em princípios físicos de saldo de energia acima do dossel da cultura. Esse método foi uma adaptação utilizada do modelo de Shuttleworth e Wallace (1985) que já modificou o proposto de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965). O modelo utilizado neste trabalho separa os componentes do fluxo de vapor (evaporação e transpiração) e pressupõe que os fluxos de calor da superfície do solo estão em paralelo com os fluxos de calor das folhas no dossel, então ele baseia-se num arranjo paralelo de resistência, de acordo com a Figura 11 (NORMAN et al, 1995; KUSTAS; NORMAN, 1999).

Figura 11- Uma representação gráfica do modelo de evapotranspiração proposto (E + T). Em que, H_s é o fluxo de calor sensível, T é o fluxo de calor latente de transpiração, E é o fluxo de calor latente de evaporação, (z_0) comprimento de rugosidade e o (d) do deslocamento do plano zero.



Fonte: Adaptada de Gardiol et al., (2003); Shuttleworth & Wallace (1985).

A evapotranspiração potencial foi calculada conforme a (Equação 6):

$$ET = \alpha E + T \quad (6)$$

em que, α é um fator de ponderação para a evaporação do solo. Este fator depende de índice de área foliar, sendo $\alpha = 1$ se $IAF \leq 2$; $\alpha = 0$ se $IAF \geq 4$ e $\alpha = (4 - IAF)/2$ para valores intermediários de IAF e conforme adaptação realizada nesta pesquisa baseado no tratamento de dados, após a planta atingir o $IAF \geq 4$, a evaporação é igual a zero.

A transpiração (T) e a evaporação (E) foram obtidas conforme as seguintes Equações (7 e 8), na mesma ordem:

$$\lambda T = \frac{\Delta(R_n - R_n^s) + \rho c_p D / (r_a^a + r_a^c)}{\Delta + \gamma [1 + r_s^c / (r_a^a + r_a^c)]} \quad (7)$$

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n^s - G) + \rho c_p D / (r_a^a + r_a^s)}{\Delta + \gamma [1 + r_s^s / (r_a^a + r_a^s)]} \quad (8)$$

em que, λ é o calor latente de vaporização da água, Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor [$\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$], R_n é o saldo de radiação acima do dossel ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), R_{ns} é o saldo de radiação na superfície do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), G o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), ρ é a densidade atmosférica (kg m^{-3}), c_p é a constante do calor específico do ar ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), D o déficit de pressão de vapor do ar (kpa), γ a constante psicrométrica, r_a^c resistência da camada limite do dossel, r_s^c resistência estomática do dossel, r_a^a resistência aerodinâmica entre o dossel e a altura de referência, r_a^s resistência aerodinâmica entre o solo e a altura média do dossel e r_s^s é a resistência da superfície do solo (Figura 11). O R_{ns} diário foi calculado utilizando a relação da lei de Beerø, dada pela Equação 9. Já R_n para o cultivo do milho foi estimado a partir de dados de um experimento de milho no ano 2002 em função da irradiação solar global diária (H_g) e do IAF (Equação 10) (TEODORO, 2003).

$$R_n^s = R_n \exp(-k \times IAF) \quad (9)$$

$$R_n = (\pm 0,00738)0,67979H_g + (\pm 0,04544)0,12318IAF \quad (10)$$

3.5.2.1 Resistência da superfície do solo

A resistência da superfície do solo (r_s^s), também conhecida como resistência superficial, pode ser definida em função de uma pequena fração do terreno que é ocupada pela planta. O cálculo dessa resistência é através da evaporação do solo (E_s), temperatura do solo (T_s) e da pressão de vapor à superfície do solo (e_s), desta forma a resistência superficial pode ser definida pela Equação 11 (SHUTTLEWORTH; WALLACE, 1985):

$$r_s^s = (\rho c_p / \gamma) [e_w(T_s) - e_s] / \lambda E_s \quad (11)$$

Os valores dessa resistência são expressos em $s\ m^{-1}$ e são complexo de definir. Seus valores variam de 0 a 2000 $s\ m^{-1}$, em que o zero corresponde a um solo muito úmido ou em uma superfície de água livre e 2000 para um solo bastante seco (FUCHS; TANNER, 1967). Os valores de zero serve para representar uma cultura bem irrigada, por exemplo, gotejamento.

3.5.2.2 Resistências do dossel

A resistência do dossel envolve a resistência média da camada limite do dossel (r_a^c) e resistência de massa estomática do dossel (r_s^c), ambas fazem parte da resistência de superfície. Elas são influenciadas pelo índice de área foliar da cultura e tem o comportamento inversamente proporcional a área foliar total (SHUTTLEWORTH, 1976). Isso tem varias influencias no efeito das mudanças do índice de área foliar na partição de energia (absortância, transmitância e refletância). Então desta forma, as resistências de superfície podem ser escrita conforme as Equações 12 e 13 (SHUTTLEWORTH; WALLACE, 1985).

$$r_s^c = r_{ST} / 2IAF_{ef} \quad (12)$$

$$r_a^c = r_b / 2IAF_{ef} \quad (13)$$

em que, r_{ST} é a resistência média estomática (de folhas anfiestomáticas) e foi igual a 294 $s\ m^{-1}$, conforme encontrado em literatura para folhas de milho (FARAHANI; BAUSCH, 1995; STEDUTO; HSIAO, 1998), r_b é a resistência média da camada limite e o IAF_{ef} é o índice de área foliar efetivo, em que considera que apenas as folhas superiores do dossel são

ativas para transferência de vapor e de calor, devido ao fechamento dos estômatos (ALLEN et al., 1993). O IAF_{ef} foi adaptado da metodologia de Penman-Monteith (1965) e foi assumido igual a IAF observado para IAF ≤ 2 , se o $IAF \times 4$ o IAF_{ef} é igual a IAF/2 e $IAF_{ef} = 2$ para valores intermédios de IAF. A r_b foi obtida a partir da Equação 14 como Shuttleworth e Gurney (1990):

$$r_b = \frac{100}{n} \left(\frac{l}{u_h} \right)^{0,5} [1 - \exp(-n/2)]^{-1} \quad (14)$$

em que, l é a largura média da folha do dossel (m), u_h a velocidade do vento no topo do dossel e n é o coeficiente de extinção para o coeficiente de transferência turbulenta no dossel e foi assumida como 2,5 (MONTETH, 1973; UCHIJIMA, 1976).

3.5.2.3 Resistência aerodinâmica

As resistências aerodinâmicas foram assumidas através do modelo simples que varia linearmente com índice de área foliar, desde solo sem cobertura ao máximo IAF (SHUTTLEWORTH; WALLACE, 1985). As resistências, para o IAF máximo, entre o solo e o dossel $r_a^s(\alpha)$ e entre o dossel e altura de referencia $r_a^a(\alpha)$ foram calculadas baseada no comprimento de rugosidade (z_0) e o deslocamento do plano zero (d). O z_0 e d foram estimados em funções da altura da cultura e IAF (SHUTTLEWORTH; GURNEY, 1990; FARAHANI; BAUSCH, 1995). Desta forma as resistências aerodinâmicas para o IAF máximo foram calculadas conforme as Equações 15 e 16 (SHUTTLEWORTH; WALLACE, 1985).

$$r_a^s(\alpha) = \frac{\ln\{(z-d)/z_0\}}{K^2 u} \frac{h}{n(h-d)} [\exp n - \exp\{n\{1 - (d+z_0)/h\}\}] \quad (15)$$

$$r_a^a(\alpha) = \frac{\ln\{(z-d)/z_0\}}{K^2 u} \left[\ln\{(x-d)/(h-d)\} + \frac{h}{n(h-d)} \times [\exp\{n\{1 - (d+z_0)/h\}\} - 1] \right] \quad (16)$$

em que, u é a velocidade do vento na altura de referência z ($m s^{-1}$), K é a constante de von Kármán, z é altura de referencia (m) e h é a altura da cultura (m). Para uma cultura com altura de 0,3 m e velocidade do vento de $2 m s^{-1}$, o valor foi igual de $r_a^s(\alpha) = 128 s m^{-1}$ e $r_a^a(\alpha) = 42 s m^{-1}$ (SHUTTLEWORTH; WALLACE, 1985).

Já o cálculo das resistências aerodinâmicas para o solo nu ($r_a^a(0)$) foram dada pelas seguintes Equações 17 e 18 (SHUTTLEWORTH; WALLACE, 1985).

$$r_a^s(0) = \ln(z/z_0') \ln\left\{\frac{(d+z_0)}{z_0'}\right\} / k^2 u \quad (17)$$

$$r_a^a(0) = \ln(z/z_0') / K^2 u - r_a^s(0) \quad (18)$$

em que, z_0 é o comprimento efetivo da rugosidade do solo. Para o solo nu z_0 é comumente tomado como 0,01 m (VAN BAVEL; HILLEL, 1976). Os valores dessas resistências aerodinâmica para o solo nu com a velocidade do vento igual a 2 m s⁻¹ foram $r_a^s(0) = 49$ s m⁻¹ e $r_a^a(0) = 34$ s m⁻¹ (SHUTTLEWORTH; WALLACE, 1985).

A resistência aerodinâmica da cultura entre solo e o dossel e entre o dossel e a altura de referencia, r_a^s e r_a^a , respectivamente foram determinada em função do IAF, dada pelas seguintes Equações (19 e 20):

$$\left. \begin{aligned} r_a^a &= \frac{1}{4} IAF r_a^a(\alpha) + \frac{1}{4} (4 - IAF) r_a^a(0) \\ r_a^s &= \frac{1}{4} IAF r_a^s(\alpha) + \frac{1}{4} (4 - IAF) r_a^s(0) \end{aligned} \right\} 0 \leq IAF \leq 4 \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} r_a^a &= r_a^a(\alpha) \\ r_a^s &= r_a^s(\alpha) \end{aligned} \right\} IAF > 4 \quad (20)$$

3.6 Eficiência no uso da água

A eficiência no uso da água foi estimada, em g L⁻¹ que é equivalente kg m⁻³, tanto para a produtividade de grão, (EUA_g), quanto para a biomassa seca total (EUA). O calculo da eficiência no uso da água levou em consideração o ponto de vista fisiológico como a razão entre a biomassa acumulada ou a produtividade de grãos e a água consumida. A EUA_g foi calculado conforme a Equação 21, enquanto a EUA foi estimada por meio de regressão linear, forçada a passar pela origem, entre os valores da biomassa seca (g m⁻²) e a água consumida no período (mm) (SINCLAIR et al., 1984; HATFIELD et al., 2001; ZHANG et al., 2004; BLUM, 2005; NYAKUDYA; STROOSNIJDER, 2014):

$$EUA_g = \frac{RG}{ET} \quad (21)$$

em que, RG é o rendimento de grão (g m^{-2}) e ET (mm) é a evapotranspiração da cultura.

3.7 Medidas de radiação

Os valores de irradiância solar fotossintética incidente (Rf_I , W m^{-2}) foram estimados com uma fração de 43% da irradiância solar global (Rg , W m^{-2}), conforme Ferreira Júnior, (2013) determinou para a mesma área de estudo. Outros estudos na mesma região encontraram valores bem próximo, com coeficientes angulares da reta entre a relação de Rg e Rf_I em torno de 0,44 (FERREIRA JÚNIOR et al, 2014a; FERREIRA JÚNIOR et al., 2012; SOUZA et al., 2011). Para os valores diários de irradiação solar global (Hg , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e irradiação solar fotossintética incidente (Hf_I , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi realizado a integração dos valores instantâneo de Rg e Rf_I .

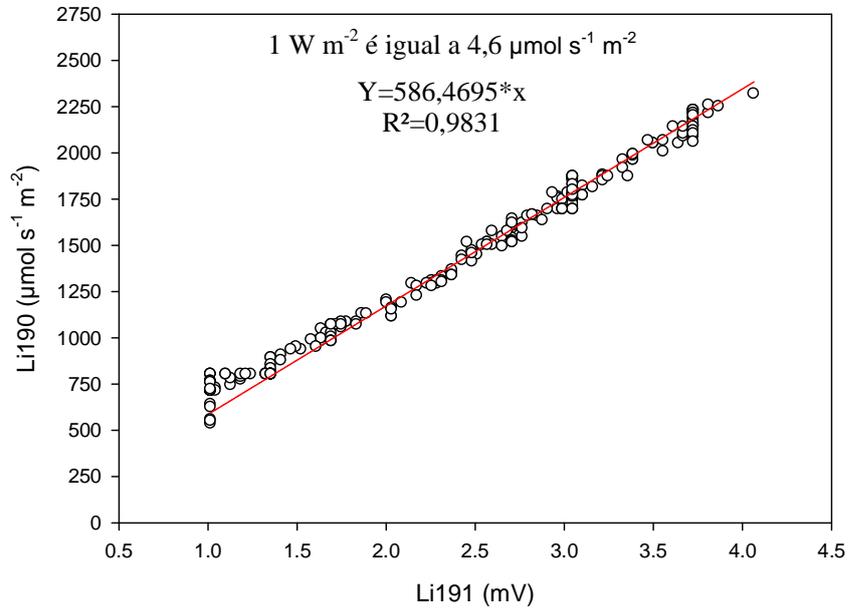
As medições de irradiância solar fotossintética transmitida (Rf_T , W m^{-2}) foram medidas quatro vezes para cada subparcela, em quatro época diferentes, das 10:00 às 14:00 horas, em dias com céu limpo, com o sensor linear quantum-sensor (LI-191SA) Figura 12. Estas medidas foram realizadas na diagonal da linha da cultura, a fim de ajustar o sensor linear na entrelinha (MONTEITH, 1993; MADDONNI, OTIGUI; CIRILO, 2001). Os dados do sensor linear foram calibrados em relação um sensor Quatum (Li-190SA, Li-COR) pela relação desses sensores (Figura 13). Para obtenção das densidades de fluxo de fótons fotossintéticos ($\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) e a conversão para irradiância fotossintética (W m^{-2}) considerou que 1 W m^{-2} é igual a $4,6 \text{ mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (MANUAL DA LI-COR, 1991). Valor semelhante foi encontrado por McCree, (1972).

Figura 12- Equipamentos de medir irradiância transmitida. A) Sensor Line Quantum (LI-191SA), na diagonal; B) caixa do datalogger; C) Datalogger ligado a bateria.



Fonte: Autor (2015)

Figura 13- Regressão linear entre medidas do sensor LI-191SA e medidas dos sensores padrão LI-190SA, Li-COR.



Fonte: Autor (2015)

3.7.1 Coeficiente de extinção da luz

O coeficiente de extinção de luz (k) foi estimado pela relação da fração da luz transmitida, (fRf_T), pelo índice de área foliar, por meio de equações exponenciais, (JONES; KINIRY, 1986; FLENET et al., 1996). A fRf_T foi estabelecido sendo a relação da Rf_T pela a Rf_I . O coeficiente de extinção da luz pelo dossel da cultura foi estimado de acordo com a Equação (22):

$$k = \left(\frac{-\ln(fRf_T)}{IAF} \right) \quad (22)$$

em que, fRf_T é a fração de irradiância transmitida e IAF é o índice de área foliar. O coeficiente de extinção de luz para o ciclo da cultura foi determinado por regressão exponencial entre a fRf_T e o IAF .

3.7.2 Cobertura do solo

A percentagem da cobertura da superfície do solo foi estimada exclusivamente pela fração de irradiância fotossintética interceptada ($1 - \exp(-k \text{ IAF})$) pelo dossel da cultura, conforme o modelo de Adams e Arkin, (1977), presente na Equação 23.

$$CS = 1 - \exp(-k \times IAF) \quad (23)$$

em que, CS é a cobertura da superfície do solo, k é o coeficiente de extinção de luz e o IAF é o índice de área foliar.

3.7.3 Eficiência do Uso da Radiação

A eficiência do uso da radiação (EUR) foi determinada por meio da regressão linear, forçada a passar pela a origem, pela relação entre a biomassa seca da parte aérea acumulada e a irradiância fotossintética interceptada (Hf_{Int}) acumulada em cada data de amostragem (MONTEITH, 1977). A irradiância fotossinteticamente interceptada pelo dossel em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ foi calculada baseada na lei de Beerø de acordo com a metodologia de Hipps, Asrar e Kanemasu, (1983) Equação (24):

$$Hf_{int} = Hf_{I} (1 - \exp(-k \times IAF)) \quad (24)$$

em que, Hf_{I} é a irradiância fotossinteticamente incidente em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

O cálculo da eficiência do uso da radiação para a produtividade de grãos (EUR_g) foi estimada pela relação entre o rendimento de cada tratamento e a irradiância fotossinteticamente interceptada acumulada, o peso dos grãos foi considerado com o percentagem de umidade de 13% (ALVES et al., 2001; PIMENTEL; FONSECA, 2011).

3.8 Variáveis de produção

A colheita foi realizada manualmente, quando os grãos apresentavam o ponto de colheita, observando-se tais características, formação da camada negra, linha de solidificação do endosperma e acúmulo de biomassa seca (BORDA et al., 1994; MARCOS FILHO, 2005; ARAUJO et al., 2006). As espigas foram colhidas nas três linhas centrais de três metros de cada tratamento, foi considerada como bordadura uma linha de cada extremo do tratamento e

a dois metros do início e do final das linhas. Depois de todos os tratamentos colhidos foram separados cinco espiga média por tratamento para coleta de dados das seguintes variáveis de produção: comprimento de espiga (CE), diâmetro de espiga (DE), massa de espiga despalhada (MED), número de fileira de grãos (NFG), número de grãos por fileira (NGF), massa de grão por espiga (MGE), peso de mil grãos (P1000), número de espiga por planta (NEP) e relação peso de grão por espiga (RGE).

O rendimento de grão (RG) foi determinado a partir do peso total de cada tratamento, as espigas foram debulhadas manualmente e separada uma amostra para determinação da umidade na colheita pelo método-padrão de estufa, 105 ± 3 °C durante 24 h, de acordo com recomendações de Brasil, (1992), a partir do peso do grão úmido no momento da colheita e o peso do grão seco e posteriormente calculada a perda de peso para umidade a 13% para penalizar o peso total no momento da colheita (PIMENTEL; FONSECA, 2011; ALVES et al., 2001).

O índice de colheita (IC) foi calculado em conformidade com a metodologia de Yang et al. (2004) e de Demétrio et al. (2008) conforme a Equação 25. Todos os rendimentos de grãos foram medidos com base em 13% de umidade.

$$IC = \frac{RG}{BS_{acum}} \quad (25)$$

em que, RG é o rendimento de grãos e BS_{acum} é a biomassa seca acumulada até a maturação fisiológica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características Meteorológicas

A época de semeadura 1 (E1) apresentou temperatura média do ar (T_m) variando de 22,1 a 26,6 °C, nos dias 07/10/2013 (51 DAS) e 18/08/2013 (101 DAS) com média de 22,0 °C durante o ciclo da cultura (Figura 14). Na E2 o dia que apresentou maior (28/10/2013 - 112 DAS) e a menor energia térmica do ar (18/08/2013 - 41 DAS), obtiveram 26,2 e 22,0 °C respectivamente, com média de 24,0 °C. A temperatura da E3 variou de 22,1 a 26,2 °C nos dias 18/08/2013 (31 DAS) e 28/10/2013 (301 DAS) na mesma ordem, com média 24,1 °C. Na E4 a magnitude da t_m foi a mais elevada, com média de 24,2 °C variando de 22,0 a 26,2 °C nos dias 28/10/2013 (91 DAS) e 18/08/2013 (20 DAS).

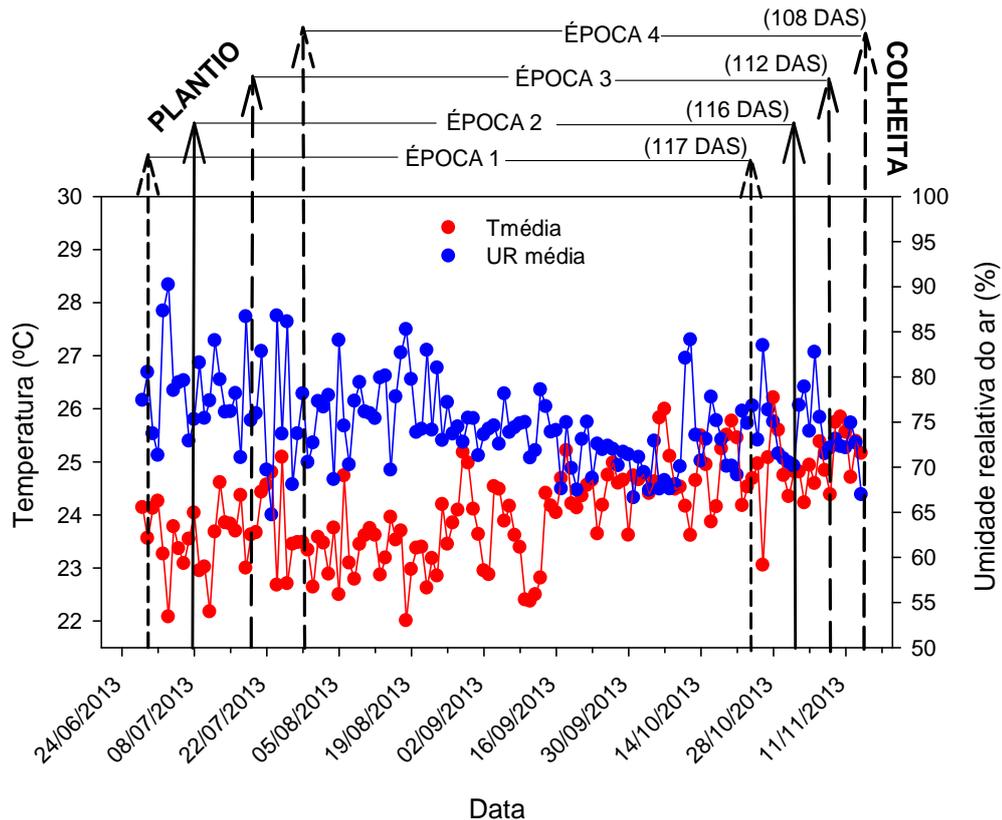
De acordo com Kiniry (1991) a faixa de temperatura para o crescimento e desenvolvimento do milho estão entre 8 e 44°C, entretanto o desenvolvimento e crescimento máximo ocorre entre 26 e 34°C. Conforme vários autores a temperatura não foi um fator limitante para o crescimento da cultura nas épocas de semeadura analisadas (VILANOVA et al., 1972; WARRINGTON; KANEMASU, 1983; FANCELLI; DOURADO NETO, 2004; FREITAS et al., 2004). Segundo França et al. (1999) a temperatura do ar em seu estudo variou entre 20 e 27 °C, durante o período experimental, não ocorrendo portanto, limitação térmica para o desenvolvimento do milho.

A umidade relativa do ar média (UR_m) durante o experimento variou de 64,7 a 90,2% nos dias 03/07/2013 e 23/07/2013, com média de 75,0%. A E2 e E3 apresentaram valores semelhantes para UR_m mínima e máxima de 64,7% (03/07/2013) e 86,7% (24/07/2013), com média de 74,6 e 74,4%, respectivamente. A E4 apresentou menor média de UR_m 74,0% e variou de 66,0 a 85,2% nas datas 01/10/2013 (64 DAS) e 18/08/2013 (20 DAS).

As épocas de semeadura influenciaram a duração do ciclo da cultura. Na E4 a cultura completou o ciclo com apenas 108 DAS, enquanto que na E1 necessitou de 117 DAS. As épocas E2 (116 DAS) e E3 (112 DAS) apresentaram valores gradativamente decrescentes. A menor duração do ciclo da cultura, para o tratamento semeado na E4, pode ser explicada pela maior disponibilidade de energia térmica diária para essa época de semeadura, o que fisiologicamente pode ter contribuído para o aumento no metabolismo da planta, e conseqüentemente alterando as reações químicas e a velocidade da atividade enzimática. Ao contrario das plantas C3, a aceleração das reações químicas são acompanhada pela

disponibilidade do substrato (CO₂) e pelo transporte de energia o que pode ter encurtado o ciclo da cultura do milho (ANDERSSON; BACKLUND, 2008).

Figura 14- Temperatura média do ar ($T_{m\acute{e}dia}$, °C) e umidade relativa média do ar ($UR_{m\acute{e}dia}$, %), durante as épocas de semeadura (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013), enfatizando dia do plantio e da colheita.



Fonte: Autor (2015)

A velocidade de crescimento da cultura do milho aumentou proporcionalmente ao aumento da temperatura, porém temperaturas elevadas durante o ciclo diminuiu o tempo de realização da fotossíntese, e resultam em menor número de grãos, ou seja, temperatura menor durante o ciclo causa redução na eficiência de interceptação e na conversão em biomassa (TOLLENAAR, 1977; MUCHOW et al, 1990; ANDRADE et al., 1993; CIRILO & ANDRADE, 1994; BERGAMASCHI, 2006). Aspectos similares com a duração do ciclo em relação ao aumento da temperatura do ar na fase vegetativa da cultura foram encontrados por outros autores (DIDONET et al., 2002; WAGNER et al., 2011) e isso refletiu em menor ou maior acúmulo de biomassa e rendimento de grãos.

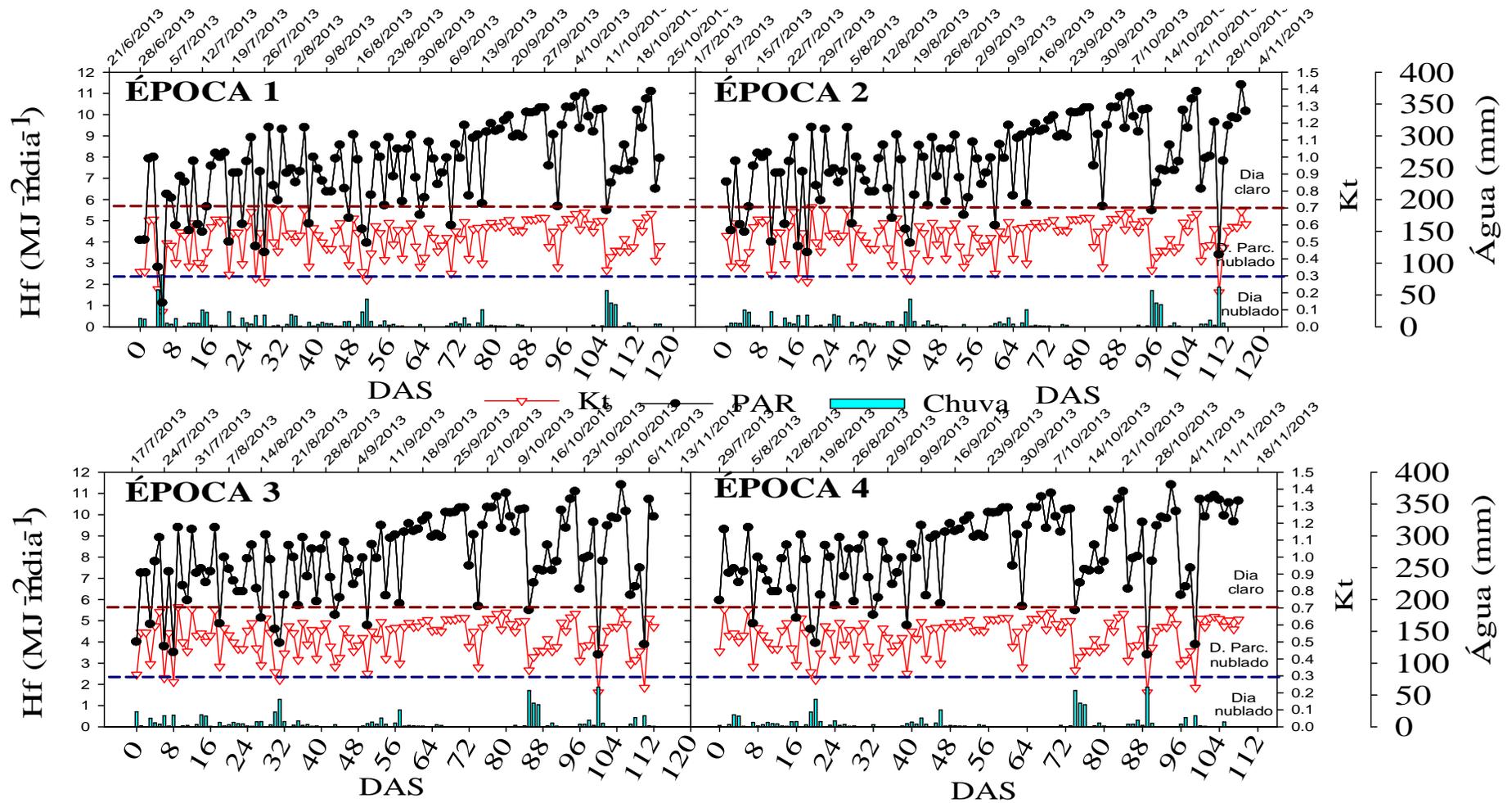
A irradiação fotossintética incidente (Hf_I , MJ m⁻² dia⁻¹) ocorrida nos tratamentos semeados nas épocas E2, E3 e E4 variaram de 3,4 a 11,4 MJ m⁻² dia⁻¹, nas datas (26/10/2013 e 31/10/2013) Figura 15. Enquanto na E1 os valores se mostram inferiores 68 e 8% abaixo de Hf_I mínimo (1,1 MJ m⁻² dia⁻¹) e máximo (11,1 MJ m⁻² dia⁻¹). O dia com maior radiação fotossintética para a E1 foi em 21/10/2013 (115 DAS) e o de menor energia radiante disponível para as plantas foi em 03/07/2013 (5 DAS). A E2 apresentou o maior acumulado de irradiação global (2144,6 MJ m⁻²), enquanto que a E1 somou apenas 2080,8 MJ m⁻², a E3 e E4 somaram 2095,1 e 2100,8 MJ m⁻², na mesma ordem.

Em todas as épocas de semeadura, a menor transmitância atmosférica (Kt) ocorreu nos dias 03/07/2013 e 26/10/2013 igual a 0,09 (E1) e 0,20 (E1, E2 e E3) respectivamente, enquanto que as maiores foram iguais a 0,69 (E4) e 0,71 (E1, E2 e E3). A E1 apresentou 4,3% de dias nublados (5 dias), 0,8% de dias claros (1 dia) e 94,9% de dias parcialmente nublado (111 dias). A E2 apresentou apenas 3 dias nublados, 1 dia claro e o restante parcialmente nublado. A E3 obteve a mesma quantidade de dias nublados e dias claros da E2, porem a duração do período entre o plantio e a colheita foi menor. A E4 apresentou 3 dias nublados e 105 dias parcialmente nublado. O Kt foi menor em todas as épocas no período de menor energia radiante fotossinteticamente disponível e foi classificado como dia nublado.

Os dias de maior precipitação pluvial foram responsável pela menor quantidade de energia radiante fotossintética e menor transmitância atmosférica em todas as épocas analisadas (Figura 15). O dia de maior intensidade de chuva na E1 ocorreu no dia 03/07/2013, com 81,5 mm e total de 766,3 mm, no ciclo. A precipitação no ciclo da E2 foi 660,1 mm e o dia que mais choveu representa cerca de 10% do total (62,23 mm - 26/10/2013). A E3 e E4 acumularam no ciclo 628,1 e 549,4 mm de chuva, na mesma ordem, com maior chuva no mesmo dia da E2.

A irradiação solar extraterrestre incidente (H_a) durante a pesquisa variou de 29,3 a 39,2 MJ m⁻² dia⁻¹, com médias crescentes nas épocas 1, 2, 3 e 4 igual a 29,3; 29,6; 30,2 e 31,2 MJ m⁻² dia⁻¹, enquanto os valores de irradiação solar global (H_g) variaram de 2,6 (03/07/2013) a 26,5 MJ m⁻² dia⁻¹ (31/10/2013), o valor mínimo de H_g observado foi na E1, as demais épocas apresentaram valores mínimo de H_g de 7,9 MJ m⁻² dia⁻¹ (Figura 16). A irradiação solar global máxima (26,5 MJ m⁻² dia⁻¹) representou cerca de 70% da irradiação no topo da atmosfera no mesmo dia. O dia que obteve menor quantidade de energia solar na superfície coincidiu com dia de maior nebulosidade (Kt=0,09), maior precipitação pluvial (P=81,5 mm) e menor energia disponível para as plantas ($Hf_I=1,12$ MJ m⁻² dia⁻¹) Figura 15 e 16.

Figura 15- Transmitância atmosférica (K_t), irradiação fotossinteticamente incidente (H_f , $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e chuva (mm), em função dos dias após a semeadura (DAS) para as quatro épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013).



Fonte: Autor (2015)

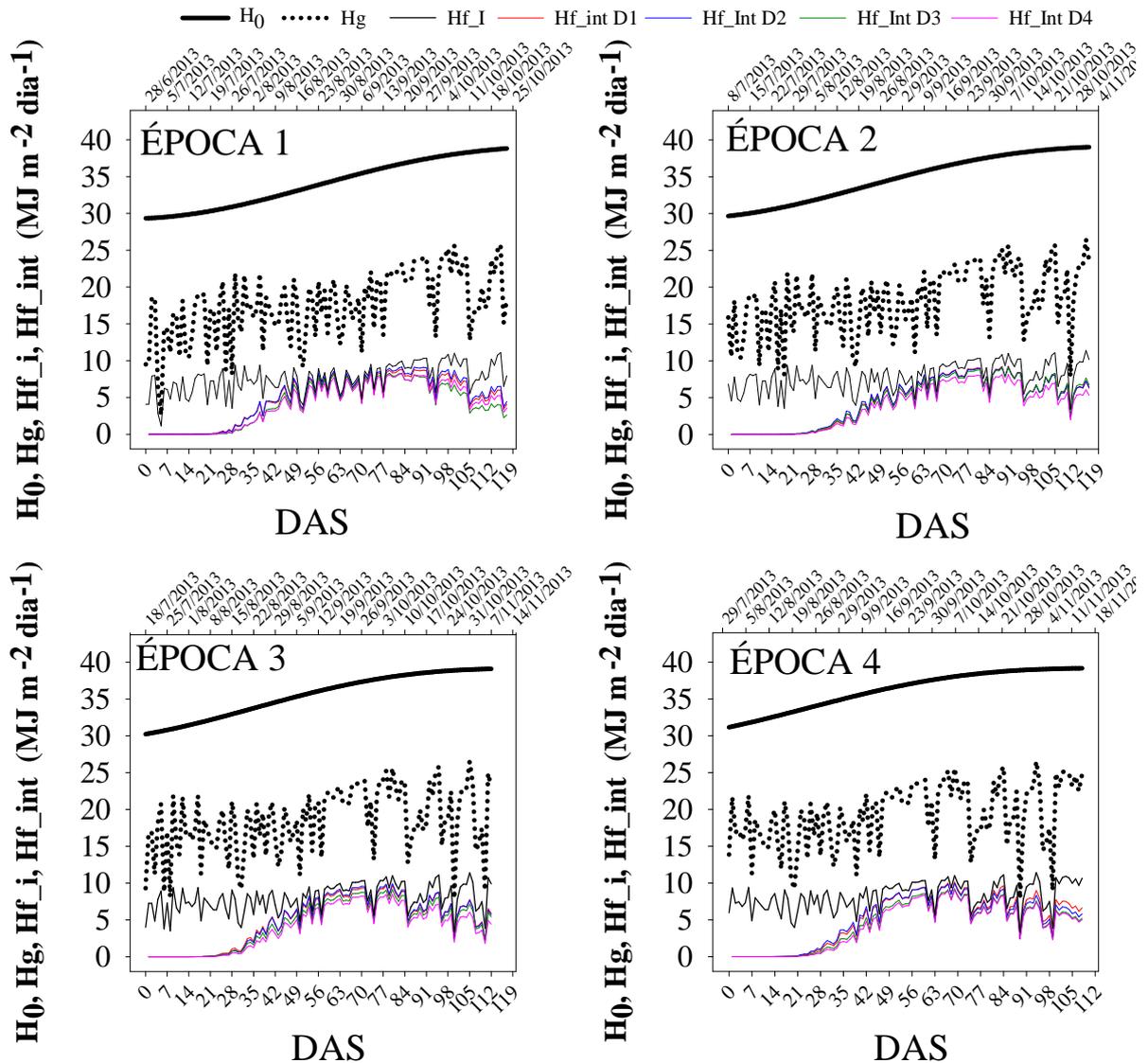
Há uma redução na quantidade de energia que sai no topo da atmosfera e a quantidade que chega à superfície terrestre, pelo fato que parte da energia é absorvida pelos gases presentes na atmosfera, parte é refletida pelas nuvens e parte é transmitida para a superfície horizontal, atingindo o solo com diferentes níveis energético que variam de acordo com a distribuição do dossel da planta (NORMAN; CAMPBELL, 1989). Souza, Nicácio e Moura, (2005) encontraram que 70% da radiação solar extraterrestre é irradiação global que chega a uma superfície horizontal, em condições de dia claro. França et al. (1999) corroboram com essa pesquisa e encontraram valores diários acima de 21 MJ m^{-2} para radiação global na maior parte experimental, ocorrendo uma redução da mesma, devido a ocorrência de um período de alta nebulosidade e precipitação pluvial.

A irradiação fotossinteticamente ativa incidente significa o máximo de energia radiante que a planta poderia ter absorvido em épocas diferentes, e representa 43% da irradiação global para esta região, pois as plantas absorvem energia nos comprimentos de onda de 400 a 700 nm, enquanto que, a energia global pode variar de 305 a 2800 nm. A época de melhor disponibilidade de energia fotossintética foi a E2, seguido da E3, E4 e E1.

A irradiação fotossinteticamente ativa interceptada (Hf_Int) total e máxima diária na E1 variou de acordo com as densidades de plantio. A D2 interceptou maior quantidade de energia ($564,0 \text{ MJ m}^{-2}$) e com o máximo de $9,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (83 DAS), enquanto que a D3 acumulou a menor quantidade ($475,5 \text{ MJ m}^{-2}$) e o máximo de $8,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (73 DAS). As D1 e D4 apresentaram valores de ($563,6 \text{ MJ m}^{-2}$ e $8,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, 83 DAS) e ($480,8 \text{ MJ m}^{-2}$ e $8,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, 73 DAS), na mesma ordem.

Na E2, os valores máximo diário de Hf_Int foi igual a $8,1$ (90 DAS); $9,1$ (90 DAS); $9,2$ (90 DAS) e $9,2$ (90 DAS) para as densidades 4, 3, 2 e 1, respectivamente. Os valores acumulado para a D2 foi superior ($522,3 \text{ MJ m}^{-2}$), cerca de 14% maior de que a D4 ($450,1 \text{ MJ m}^{-2}$) que foi a menor. A D1 e D3 apresentaram valores acumulado de $517,2$ e $509,9 \text{ MJ m}^{-2}$, respectivamente. A época 3 obteve o mesmo comportamento da época 2 e o total de energia interceptada foi igual a $537,5$; $533,1$; $486,4$ e $437,2 \text{ MJ m}^{-2}$ para as densidades 2, 1, 3 e 4, na mesma ordem e o máximo diário para todas as densidades ficou entre $8,4$ a $9,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e ocorreu aos 80 DAS. A época 4 obteve valores de Hf_Int decrescente com as densidades 1 ($542,1 \text{ MJ m}^{-2}$), 2 ($531,5 \text{ MJ m}^{-2}$), 3 ($468,6 \text{ MJ m}^{-2}$) e 4 ($450,3 \text{ MJ m}^{-2}$) e o máximo diário ocorreu aos 69 DAS, com valores variando de $9,0$ a $10,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Figura 16- Irradiação solar extraterrestre (H_0 , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), irradiação solar global (H_g , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), irradiação fotossintética incidente (H_f_I , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), irradiação fotossintética interceptada (H_f_{Int} , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para densidades (D1, 125000 pl ha^{-1}), (D2, 87500 pl ha^{-1}), (D3, 50000 pl ha^{-1}) e (D4, 37500 pl ha^{-1}), nas quatro épocas.



Fonte: Autor (2015)

A H_f_{Int} foi gradativamente crescente em todos os tratamentos até o IAF chegar ao máximo, no final da fase vegetativa da cultura, logo em seguida quando as plantas começaram a translocar os fotoassimilados para a espiga, as folhas começaram a senescer e o IAF começou a decrescer na fase reprodutiva do vegetal, com isso a irradiação interceptada pelo dossel das plantas diminuíram. Os valores de IAF é decrescente com as densidades 1, 2, 3 e 4, porem não significa que a densidade que apresentar maior IAF vai interceptar mais energia radiante em seu dossel pois depende da arquitetura do dossel, ou seja, diferente quantidade de irradiação interceptada resultante de arranjos espaciais de densidades de plantio não depende

apenas do IAF, como também do coeficiente de extinção de luz e o ângulo de incidência dos raios solares.

Marchão, Brasil e Ximenes, (2006) em pesquisa realizada no Estado de Goiás, mostraram correlação positiva entre densidades de plantas e a interceptação da radiação. O adensamento das plantas em espaçamento reduzido permitiu uma maior interceptação de radiação fotossinteticamente ativa, que apresentou como consequência maior rendimento de grãos. Em nossa pesquisa encontramos que as maiores densidades registraram a maior interceptação, entretanto comparando as duas maiores, a densidade de 87500 pl ha⁻¹ interceptou mais luz que a densidade de 125000 pl ha⁻¹, resultado este que pode ser explicado pela maior plasticidade das folhas no cultivo de menor densidade, resultados similares foram encontrado por Sangoi et al. (2011).

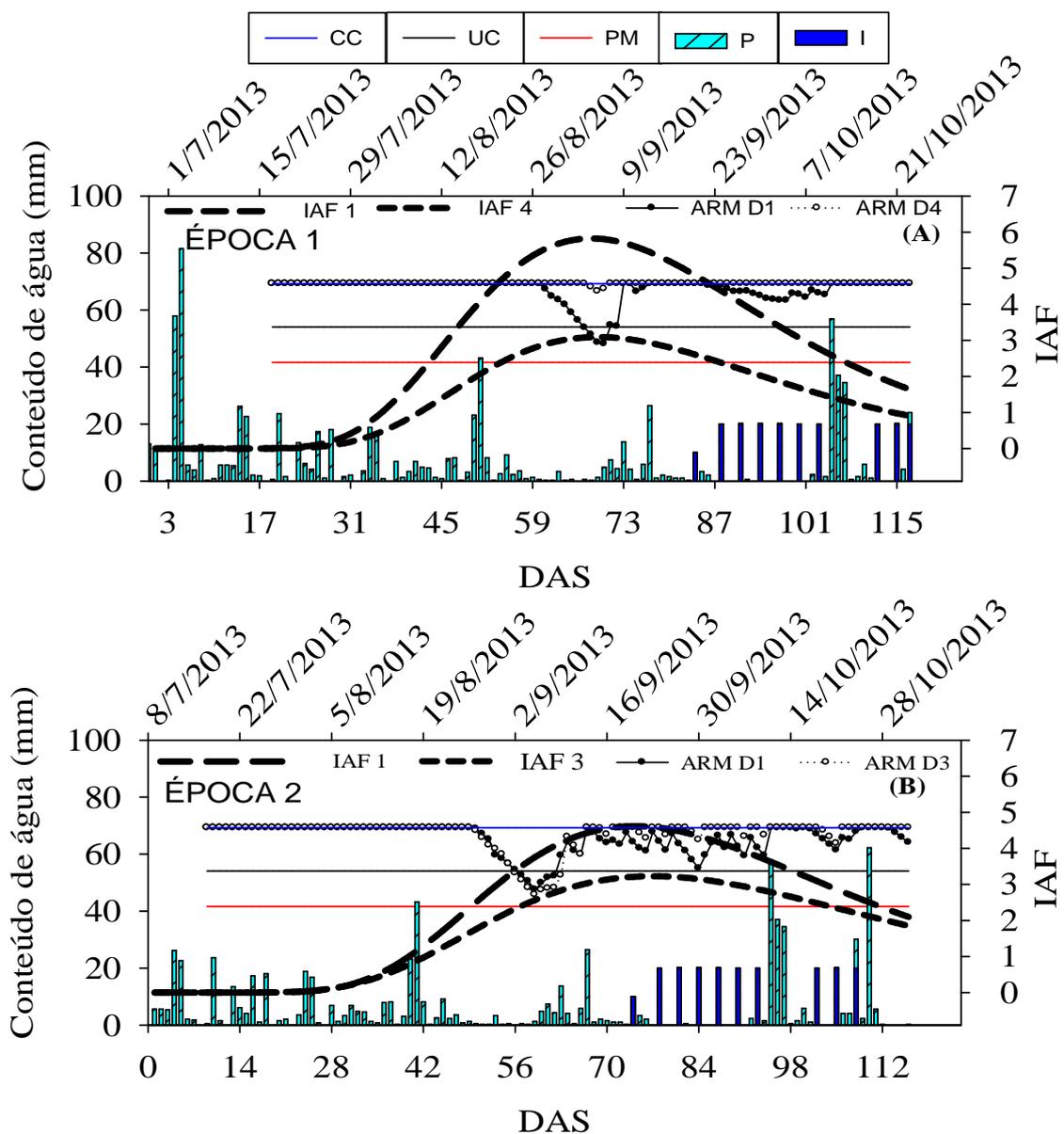
4.2 Características hídricas do solo

Na E1 foi analisado o ARM das densidades D1 e D4, o conteúdo de água no solo em quase todo o ciclo da cultura ficou na CC (69,2 mm), houve variação entre o ARM das duas densidades, o armazenamento da D1 foi inferior em torno de 10% da D4, aos 70 DAS o ARM da D4 (66 mm) ficou um pouco inferior ao limite da CC, enquanto o ARM da D1 (48 mm) ultrapassou o limite da umidade crítica (54,0 mm). O IAF aos 70 DAS foi estimado em 5,8 para a D1 e 3,1 para a D4, a queda brusca de umidade nas duas densidades foi exatamente no pico do IAF, em média, o IAF da densidade 1 foi superior cerca de 87% ao da D4. Outro motivo que causou o rebaixamento do ARM neste período foi a duração de 12 dias (58 a 69 DAS) com chuva inferior a 4,0 mm. No período de setembro a outubro foram aplicados 190 mm de irrigação para manter o ARM no nível da capacidade de campo, pois a quantidade de precipitação pluvial do período seco foi apenas 232,6 mm, sendo que 55% desse total precipitaram em três dias (105 a 107 DAS) Figura 17a.

O armazenamento de água no solo durante E2 apresentou características similares entre as densidades D1 e D3 até os 59 DAS. Aos 48 DAS o ARM começou a diminuir até ultrapassar o limite da umidade crítica, aos 59 DAS o IAF da D1 e D3 foram iguais a 3,7 e 2,6, respectivamente. O período entre 48 a 59 DAS obteve 12 dias que somaram apenas 9,1 mm de chuva, motivo pelo qual a umidade ficou abaixo da UC, porém o ARM permaneceu abaixo da UC apenas por 7 dias. A partir de 59 DAS até os 94 DAS, o conteúdo de água no solo entre as densidades de plantas começou a ter uma variação de aproximadamente 8% entre ambas, a diferença entre o IAF das densidades foi de cerca de

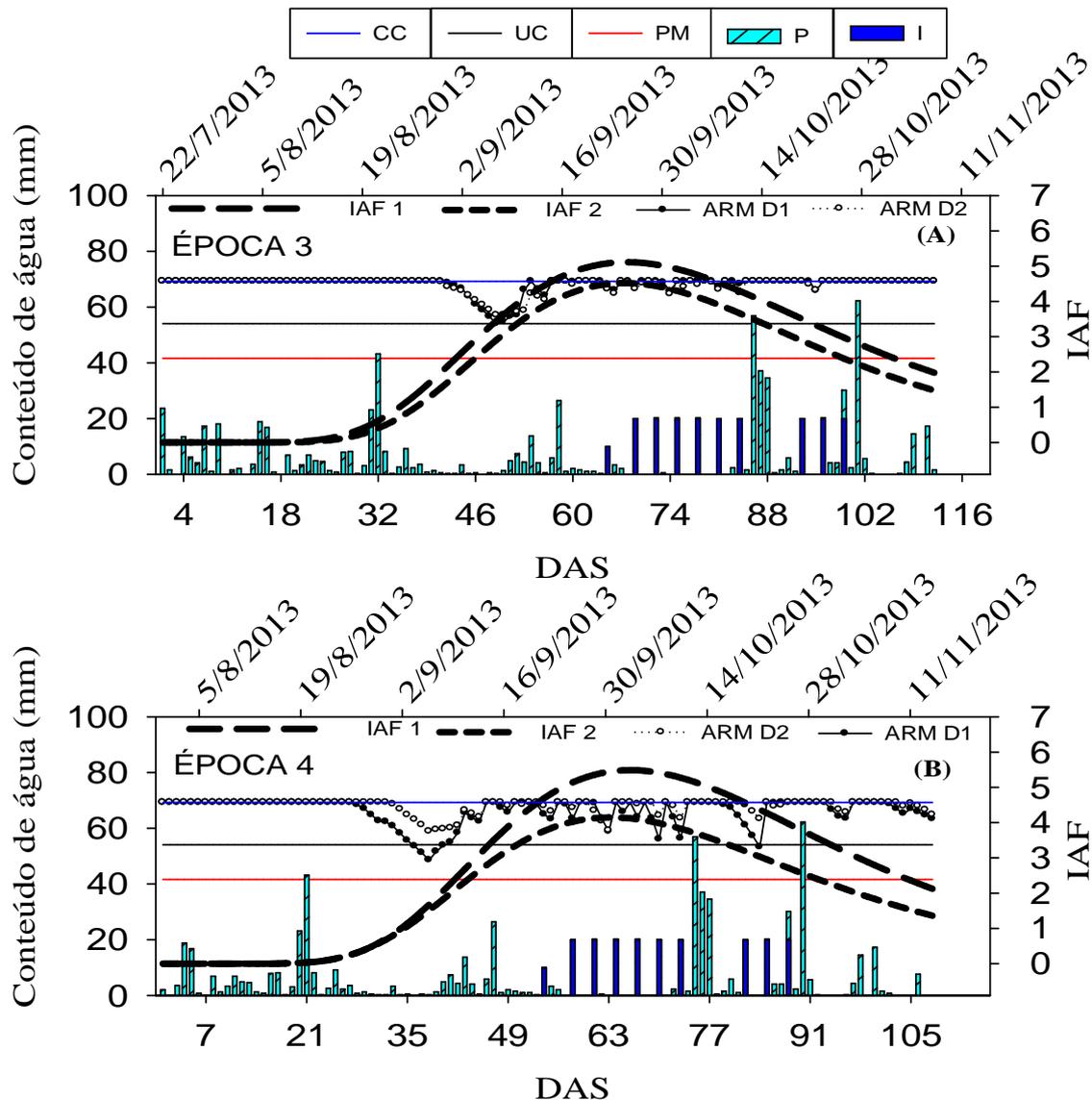
30% neste mesmo período. Aos 75 DAS, D1 e D3 atingiram o pico do IAF de 4,6 e 3,2 respectivamente. Após os 94 DAS o ARM entre as densidades variou bem menos, período de baixa absorção de água e final do ciclo da cultura. O período de 08/07/13 (plantio) a 05/09/2013 (59 DAS) a precipitação pluvial foi mais distribuída e representou 52% do total (349,1 mm), enquanto que 06/09/2013 (60 DAS) a 01/11/2013 (116 DAS) choveu 47% do total (310,9 mm), porém 28% precipitou em apenas 4 dias. (Figura 17b).

Figura 17- Capacidade de campo (CC), umidade crítica (UC), ponto de murcha (PM), precipitação pluvial (p), irrigação (I), armazenamento de água (ARM) e índice de área foliar (IAF) para densidades 1 (D1, 125000 pl ha⁻¹), 3 (D3, 50000 pl ha⁻¹) e 4 (D4, 37500 pl ha⁻¹), em função dos dias após a semeadura (DAS) para E1 (A) e E2 (B).



O conteúdo de água no solo da E3 entre as densidades D1 e D2 foram próximos até as plantas atingirem o pico do IAF aos 68 DAS, após esse período a D2 apresentou ARM médio superior apenas em 5,0% o ARM da D1. O IAF máximo da D1 foi 5,1, enquanto que o da D2 foi 11% inferior. Em todo ciclo da cultura o ARM se manteve na CC, apenas no período de 41 a 55 DAS o ARM sofreu uma redução, mas não chegou a umidade crítica. A precipitação pluvial total do ciclo foi 628,1 mm, sendo que 345,9 mm precipitou de 18/07/13 a 13/09/13 (57 DAS), bem distribuído e 282,2 mm nos dias restante do ciclo da cultura (55 dias), com uma ressalva que aproximadamente 80% desse choveu em 6 dias (Figura 18A).

Figura 18- Capacidade de campo (CC), umidade crítica (UC), ponto de murcha (PM), precipitação pluvial (p), irrigação (I), armazenamento de água (ARM) e índice de área foliar (IAF) para densidades 1 (D1, 125000 pl ha⁻¹) e 2 (D2, 87500 pl ha⁻¹), em função dos dias após a semeadura (DAS) para época 3 (A) e época 4 (B).



A variação do IAF das densidades D1 e D2 da E4 foi superior ao da E3, o pico do IAF da D1 foi igual a 5,5 (66 DAS), enquanto D2 foi igual a 4,1 (63 DAS), os armazenamentos de água no solo em quase todo o ciclo da cultura permaneceu na capacidade de campo, com exceção do ARM da D1 no período de 35 a 40 DAS que ultrapassou o limite inferior da UC. Do início aos 42 DAS, o armazenamento médio da D1 ficou inferior em torno de 7% ao da D2. Depois desse período, o armazenamento de ambas as densidades foram praticamente o mesmo. A distribuição das chuvas nessa época também foi irregular, pois no período de 48 dias (0 a 46 DAS) precipitou 260,4 mm bem distribuído e no intervalo de 14/09/2013 (47 DAS) a 14/11/2013 (108 DAS) precipitou 289,06, sendo que 240,3 mm desse total choveu em apenas 8 dias.

Os armazenamentos de água no solo nas densidades da E4 apresentaram uma variação maior em relação outras épocas (E1, E2 e E3) no período de 20/09/13 (53 DAS) a 22/10/13 (85 DAS). Essa causa pode ser proveniente ao consumo maior de água pela planta em uma fase fenológica mais avançada, na qual a demanda da cultura torna-se maior. O período (27 a 38 DAS) de 12 dias com chuvas inferiores a 4,0 mm causou um rebaixamento nos níveis de água no solo, a D1 chegou a 48,5 mm aos 38 DAS, enquanto a D2 alcançou o nível de 58,9 mm ao mesmo dia. A diferença de mais de 20,0 mm entre o ARM das densidades pode ser explicado pela diferença média durante o ciclo de aproximadamente 30% no IAF. No IAF máximo as densidades D1 e D2 alcançaram 5,5 (66 DAS) e 4,1 (62 DAS), respectivamente.

A irregularidade das chuvas também foi observada na E4 (Figura 18B). A lâmina de irrigação aplicada em todas as épocas foi padrão, porém em período fenológico diferente. A precipitação pluviométrica nas épocas foi superior a quantidade mínima recomendada por Doorenbos e Kassan, (1979), que é de 500 mm, porém a má distribuição hídrica da região fez necessária adoção de irrigação para que o experimento fosse conduzido sem deficiência hídrica.

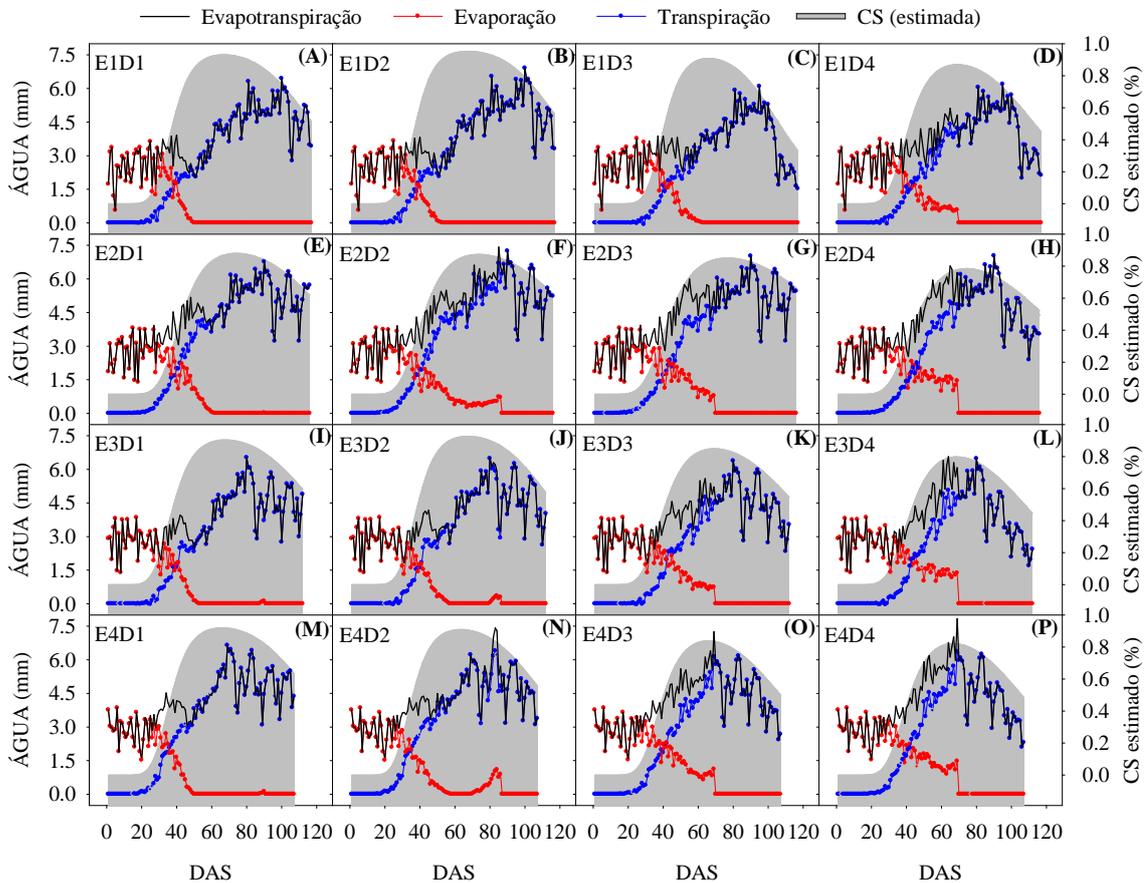
O armazenamento de forma geral mostrou-se inverso ao IAF, quanto maior o índice de área foliar, menor foi o armazenamento de água no solo, o que pode ser explicado por maior perda de água por transpiração no pico do crescimento da cultura. Apesar do armazenamento de água de algumas densidades em diferentes épocas ter alcançado o limite inferior da umidade crítica, isso não significa afirmar que as plantas sofreram estresse hídrico, pois o ARM medido levou em consideração apenas a camada de 0 a 30 cm de profundidade, e a maior parte da umidade de água no solo estavam nas camadas mais profundas, características observadas em algumas sondas colocadas de 30 a 60 cm.

4.3 Evaporação, transpiração e evapotranspiração potencial

A maior evapotranspiração potencial acumulada do ciclo para a E1 ocorreu na D2 (449,6 mm), em que 77% foram representados por transpiração (348,4 mm) e 23% pela evaporação do solo (Figura 19B). A partir dos 53 DAS quando a cultura apresentava cerca de 87,4% de cobertura, a evaporação do solo foi igual a zero e a evapotranspiração diária foi igual a transpiração, do mesmo modo que o início do crescimento da cultura até os 25 DAS a evapotranspiração era representado basicamente pela a evaporação do solo, pois a cobertura do solo era de apenas 4% (Figura 19B e Tabela 2). A ET da E1D2 diário variou de 0,6 a 6,9 mm aos 5 DAS e 100 DAS, na mesma ordem (Figura 19B) . Enquanto que a D3 apresentou o menor valor total de ET (398,4 mm), em que 281,7 mm foi transpiração e 116,7 mm foi evaporação, a evaporação foi nula para este tratamento a partir dos 63 DAS quando a cobertura do solo alcançou o pico em 90%, a ET máxima diária ocorreu aos 95 DAS e foi igual a 6,0 mm (Figura 19C). Baseado em pesquisa (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 2003) durante a maturação dos grãos a demanda hídrica pode chegar a 7,5 mm dia⁻¹. O cultivo mais adensado (D1) cessou a evaporação do solo aos 50 DAS quando apresentava 84,7% de CS (Figura 19A), enquanto que o cultivo menos adensado (D4), a evaporação foi nula após os 70 DAS (Figura 19D), durante o ciclo a perda de água por evaporação representou 23% e 30% da ET para as densidades D1 e D4 (Figura 19A e D). A energia fotossintética e térmica acumulada para as plantas nesta época foi de 894,7 MJ m⁻² e 1639,8 GD (Tabela 2).

O tratamento E2D2 apresentou a maior ET acumulada (522,2 mm), sendo que 74% representado pela transpiração. A evaporação do solo máxima diária foi 3,8 mm e média de 1,2 mm dia⁻¹, a partir de 85 DAS a evaporação foi nula, entretanto aos 55 DAS a evaporação já era inferior a 1,0 mm dia⁻¹, aos 76 DAS a evaporação chegou a 0,3 mm, quando a cobertura foi de 87%, mas logo em seguida até os 85 DAS a evaporação voltou a aumentar devido ao decréscimo da cobertura do solo (Figura 19F). Já a ET da D4 apresentou 31% de evaporação acumulada (151,8 mm) e o menor valor de ET total (491,0 mm), a cobertura máxima atingiu apenas 78% e ao final do ciclo da cultura a cobertura decresceu até 52%. A quantidade de energia térmica acumulada pela plantas foi 1638,1 GD e a radiação solar fotossintética ativa disponível nesta época foi 922,2 MJ m⁻², entretanto o tratamento que mais foi eficiente para interceptar essa radiação acumulou 522,3 MJ m⁻² representado por 87500 plantas por hectare (D2) (Tabela 2).

Figura 19- Evaporação (E), transpiração (T), evapotranspiração potencial (ET) e cobertura do solo (CS estimada), em função dos dias após a semeadura (DAS) para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha⁻¹), (D2, 87500 pl ha⁻¹), (D3, 50000 pl ha⁻¹) e (D4, 37500 pl ha⁻¹).



Fonte: Autor (2015)

A E3 apresentou uma amplitude de ET de apenas 13,1 mm entre as densidades, em que os extremos foram as D1 (424,1 mm) e a D3 (437,2 mm) Tabela 2. A evapotranspiração máxima e mínima do ciclo foi de aproximadamente 6,0 e 1,3 mm dia⁻¹ para todas as densidades. A evaporação foi gradativamente decrescente a medida que aumentava as densidades. A cobertura do solo apresentou o pico de 90 (62 DAS), 93 (65 DAS), 85 (66 DAS) e 80% (60 DAS) para as densidades 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A radiação fotossintética incidente acumulada disponível para plantas na época 3 foi 900,0 MJ m⁻² e 1590,7 GD de energia térmica acumulada (Tabela 2). Isso indica que as práticas de manejo da cultura modifica a fração de evaporação e transpiração (LI et al., 2013).

Tabela 2- Valores acumulados de evapotranspiração potencial, evaporação do solo, transpiração, radiação fotossintética incidente e interceptada, chuva + irrigação e unidades térmicas para as densidades (D1, 125000 pl ha⁻¹), (D2, 87500 pl ha⁻¹), (D3, 50000 pl ha⁻¹) e (D4, 37500 pl ha⁻¹) das quatro épocas.

VARIÁVEIS AGROMETEOROLÓGICAS				
ÉPOCA 1 (28/06/2013)	D1	D2	D3	D4
Evapotranspiração potencial total (mm)	436,78	449,65	398,41	426,52
Evaporação do solo acumulada (mm)	100,51	101,23	116,66	126,24
Transpiração acumulada (mm)	336,27	348,42	281,74	300,28
Radiação fot. incidente acumulada (MJ m ⁻²)		894,75		
Radiação fot. interceptada acumulada (MJ m ⁻²)	543,58	563,98	475,55	480,80
Chuva (mm)		766,32		
Irrigação (mm)		190,00		
Unidades térmicas (GD)		1639,80		
ÉPOCA 2 (08/07/2013)	D1	D2	D3	D4
Evapotranspiração potencial total (mm)	500,91	522,25	514,11	491,02
Evaporação do solo acumulada (mm)	126,19	138,60	145,16	151,77
Transpiração acumulada (mm)	374,72	383,65	368,94	339,25
Radiação fot. incidente acumulada (MJ m ⁻²)		922,17		
Radiação fot. interceptada acumulada (MJ m ⁻²)	517,20	522,34	509,86	450,10
Chuva (mm)		660,15		
Irrigação (mm)		190,00		
Unidades térmicas (GD)		1638,11		
ÉPOCA 3 (18/07/2013)	D1	D2	D3	D4
Evapotranspiração potencial total (mm)	424,09	435,69	437,18	427,14
Evaporação do solo acumulada (mm)	112,04	116,80	141,25	151,32
Transpiração acumulada (mm)	312,05	318,89	295,93	275,83
Radiação fot. incidente acumulada (MJ m ⁻²)		900,89		
Radiação fot. interceptada acumulada (MJ m ⁻²)	533,07	537,46	486,36	437,15
Chuva (mm)		628,15		
Irrigação (mm)		190,00		
Unidades térmicas (GD)		1590,70		
ÉPOCA 4 (29/07/2013)	D1	D2	D3	D4
Evapotranspiração potencial total (mm)	449,67	450,70	446,89	446,70
Evaporação do solo acumulada (mm)	110,81	118,58	145,64	151,04
Transpiração acumulada (mm)	338,86	332,12	301,25	295,66
Radiação fot. incidente acumulada (MJ m ⁻²)		903,37		
Radiação fot. interceptada acumulada (MJ m ⁻²)	542,06	531,52	468,62	450,30
Chuva Irrigação (mm)		549,41		
Irrigação (mm)		190,00		
Unidades térmicas (GD)		1546,01		

Fonte: Autor (2015)

A E4 apresentou o mesmo aspecto da E2, entretanto a variação da evapotranspiração entre as densidades D2 e D4 foi de apenas 4,0 mm. A energia térmica acumulada (1546,0 GD) foi menor que todas as épocas e a radiação solar acumulada na faixa fotossintética foi de 903,4 MJ m⁻², porém do total da radiação fotossintética disponível para a planta a densidade 2 foi a que mais interceptou luz nas épocas 1, 2 e 3. Na E4 a densidade que mais interceptou energia radiante foi a D1 (542,1 MJ m⁻²) (Tabela 2).

A evapotranspiração potencial da cultura é particionada em evaporação do solo e transpiração da planta e ambas depende de vários fatores como: cobertura do solo, radiação solar, energia térmica acumulada, densidades de plantas, entre outros. O arranjo espacial da D2 (87500 plantas ha⁻¹) apresentou a maior demanda hídrica entre as épocas, com exceção na E3. A E2 apresentou maior quantidade de energia fotossintética e o segundo maior acúmulo de unidades térmica entre as épocas. A evaporação do solo diminui com aumento da cobertura do solo e anula-se no seu o pico. Também a maior densidade (D1) atingiu o pico de cobertura no período menor que a densidade com menor número de planta por área (D4).

Vários pesquisadores (SHUTTLEWORTH; WALLACE, 1985; DOLMAN, 1993; VAN DER HURK;MCNAUGHTON, 1995; NORMAN et al., 1995; GARDIOL et al., 2003) corroboram com os resultados obtidos nesta pesquisa e relatam que a evaporação e a transpiração podem atingir valores semelhantes, porém a importância de cada componente muda com a cobertura do solo. Gardiol et al. (2003) encontrou valores reais de evapotranspiração potencial acumulada de 386 mm para densidade de 22 mil plantas por hectare e 551 mm para cultivo com 91 mil plantas por hectare, para a cultura do milho. Os dados reais foram comparados por três modelos de estimava de ET e o modelo que apresentou a melhor concordância, principalmente para o cultivo mais adensado, foi o modelo utilizado neste trabalho (E+T) proposto pelos autores. Corroborando com esse trabalho, os autores encontraram média diária de 5,0 mm, na fase de 64 a 142 dias após a emergência, para o cultivo com 91000 pl ha⁻¹, enquanto que no cultivo menos denso a média no início do crescimento da cultura foi de 3,4 mm dia⁻¹.

Rocha et al. (2014) estudando balanço de água no solo, na população de 55 mil plantas por hectare, encontraram valores máximo diário de evapotranspiração da cultura próximo de 7,0 mm, entretanto valores acumulado de evapotranspiração real foi inferior ao deste trabalho (361,6 mm) estimado pelo método da FAO 56 (ALLEN et al., 1998). Wagner et al. (2013) com base em uma série histórica de dados climatológicos, para o período de 1984 a 2007, estimou valores de evapotranspiração máxima da cultura, através do produto da evapotranspiração de referencia (modelo de Penmann-Monteith, padrão FAO 56), multiplicado pelo o coeficiente de cultura, encontraram valores acumulado variando de 368 a 398 mm, em várias época. Barbieri et al. (2012) observaram um aumento de 8% na evapotranspiração da cultura do milho, no espaçamento mais estreito. Zhang et al. (2014) confirma essas pesquisas e seus resultados mostram uma variação na média da evapotranspiração da cultura do milho, submetido a diferentes manejos entre 380 a 398 mm.

Na pesquisa realizada por Medeiros, (2009), com a mesma variedade de milho deste estudo, foram encontraram resultados semelhantes, nos estágios iniciais da cultura a transpiração foi baixa, sendo determinada pelo IAF, enquanto que neste mesmo período, a evaporação foi alta, devido a grande exposição do solo e a baixa cobertura pela cultura. No estágio V6 o comportamento dos componentes (evaporação e transpiração) da evapotranspiração foi inverso e a partir de V12 a evapotranspiração passou a ser regida, fortemente, pela demanda transpiratória das folhas. De acordo com seus resultados, corroborando com essa pesquisa, o tratamento que apresentou a maior demanda hídrica (434,35 mm) foi o que obteve maior radiação global. Os valores de transpiração foram aproximadamente representados por 70% da evapotranspiração da cultura. De acordo com ROSENBERG, (1983) 50% da evapotranspiração total foram representadas pela transpiração quando o índice de área foliar era igual a 2,0 e 95% quando o IAF era igual a 4.

4.4 Desenvolvimento e variáveis biométricas

4.4.1 Estádios Fenológicos

Os estádios fenológicos foram relacionados com dias após a semeadura (DAS) e em função dos graus-dia acumulados, (Tabela 3). O estágio vegetativo (V) tem início com a emergência da plântula (VE) até o pendoamento (VT), a soma térmica até o final do V variou entre 783 a 852 GD para as E3 e E1, na mesma ordem, que ocorreu aos 57 e 62 DAS, respectivamente. A E4 acumulou menos graus-dia para chegar aos estádios mais importante da fase vegetativa (V3, V6, V12). De acordo com Ritchie, Hanway e Benson (2003) são nesses estádios que ocorre a iniciação de todas as folhas e inflorescência feminina (V3), o sistema radicular nodular se torna o principal meio de absorção em funcionamento, o colmo inicia o período de grande alongação (V6) e no ultimo estágio citado é quando começa a formar o número de óvulos em cada inflorescência feminina e o tamanho da espiga. Ao final do estágio reprodutivo R6 as plantas acumularam de 1546 a 1639 GD nas E4 e E1, na mesma ordem, durante o período de 108 e 117 DAS. A E2 acumulou (1638 °GD/ 116 DAS) praticamente a mesma quantidade de graus-dia da E1, no período menor de tempo durante o ciclo da cultura. A duração do ciclo vegetativo da cultura é influenciada principalmente pela temperatura do ar e o fotoperíodo. A semeadura mais tardia (E4) apresentou a maior temperatura média do ar aliada alta eficiência fotossintética da planta o que exerceu influencia na velocidade das reações química da fotossíntese e acelerou o metabolismo da planta o que

provocou encurtamento do ciclo da cultura. Lyra et al. (2010), na pesquisa realizada na mesma região deste estudo também observaram acúmulo diferente de graus-dia para a cultura completar o ciclo em diferentes épocas de semeadura, a constante térmica do milho variou entre 1500 a 1600 GD.

Tabela 3- Estádios fenológicos em função dos graus-dia acumulado (GD, GD) e dias após a semeadura (DAS) para as épocas de semeadura (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2014).

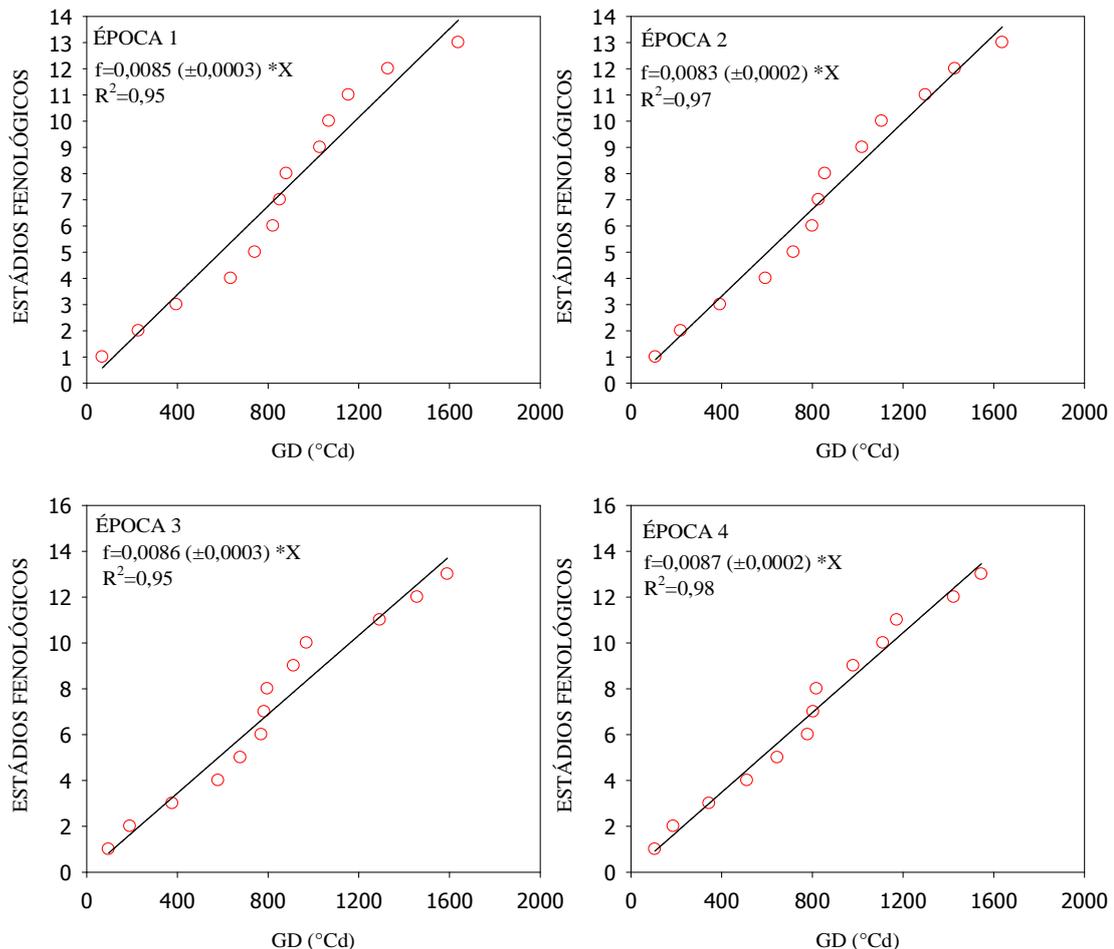
GRAUS-DIA E DIAS APÓS A SEMEADURA (DAS)				
ÉPOCAS	E1	E2	E3	E4
SEMEADURA	28/06/2013	08/07/2013	18/07/2013	29/07/2013
ESTÁDIO	GD/DAS	GD/DAS	GD/DAS	GD/DAS
VE	69/4	108/7	97/6	106/7
V3	229/16	220/15	191/13	187/13
V6	396/28	393/28	378/27	345/25
V9	636/46	594/43	580/42	512/37
V12	742/54	717/52	678/49	646/47
V18	822/60	800/58	770/56	780/57
VT	852/62	828/60	783/57	804/58
R1	881/64	856/62	797/58	819/59
R2	1029/75	1020/74	913/66	981/70
R3	1069/78	1106/80	970/70	1112/79
R4	1155/84	1299/93	1293/92	1173/83
R5	1329/96	1429/102	1458/103	1424/100
R6	1639/117	1638/116	1591/112	1546/108

Fonte: Autor (2015).

Dourado Neto et al. (2003) estudando interações entre densidade populacional, espaçamento entrelinhas de plantios e genótipos de ciclo semi-precoce e precoce encontraram valores máximo de 1780 GD para a cultura completar o ciclo, valores próximo a 150 GD para as plantas emergirem e aproximadamente 900 GD para as plantas começarem o florescimento, para o município de Piracicaba-SP, no período de 20 de novembro a 10 de Abril. Wagner et al. (2011) mostraram a duração do ciclo da cultura do milho, em Guarapuava-PR, com uma série histórica de dados, utilizando período pré definido por Gadioli (2000), verificaram que o ciclo total estimado variou entre 114 a 121 dias, a duração total das fases fenológicas do período vegetativo (VT) variou entre 53 a 60 dias, com seqüencial encurtamento para as semeaduras mais tardias. O encurtamento do período foi da ordem de 8 dias entre datas extremas, os resultados apresentados foram semelhante a essa pesquisa. Brunini et al. (2006) corroboram com essas pesquisas e afirma que o acúmulo elevado de unidades térmica diária acelerou o desenvolvimento fenológico de plantas de milho.

O coeficiente angular da regressão linear, forçada a passar pela origem, entre os estádios fenológicos e os graus-dia acumulados, mostra a exigência térmica que a planta necessita para mudar de estágio fenológico em cada época, ou seja, quanto maior for o coeficiente angular da reta, menor é a exigência térmica para as plantas completarem o ciclo de produção, com isso a E4 apresentou a menor necessidade térmica acumulada entre VE e R6, enquanto que a E2 apresentou a maior quantidade de graus-dia acumulado até a maturidade fisiológica (R6). Os coeficientes de determinação (R^2) das regressões apresentaram valores elevados entre 0,95 e 0,98 (Figura 20).

Figura 20- Regressão linear forçada a passa pela origem entre os estádios fenológicos (1-VE, 2-V3, 3-V6, 4-V9, 5-V12, 6-V18, 7-VT, 8-R1, 9-R2, 10-R3, 11-R4, 12-R5 E 13-R6) e graus-dia acumulado (GD, GD) para as épocas de semeadura (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013).



Fonte: Autor (2015)

Os estádios vegetativos e reprodutivos da cultura nas épocas de semeadura foram afetados pelo aumento da temperatura no decorrer do experimento fazendo com que a mudança do estágio ocorresse no período menor de tempo. O desenvolvimento da planta de

milho para qualquer tipo de híbrido está totalmente dependente a variações de temperatura (RITCHIE, HANWAY; BENSON, 2003). Conforme Hanway (1963) o período de emergência pode variar até duas semanas após a semeadura, entretanto em condições de umidade do solo e temperatura elevadas, a emergência pode ocorrer entre 4 a 5 dias após a semeadura.

4.4.2 Variáveis de Crescimento

As variáveis de crescimento (índice de área foliar ó IAF, diâmetro do colmo - DC, altura de planta - AP e biomassa seca - BS) foram submetidas a análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$) e responderam significativamente a 5% de probabilidade, tanto para épocas quanto para densidades, com exceção da biomassa seca que não foi significativa pelo teste F para épocas de semeadura (Tabela 4).

Tabela 4- Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de épocas de semeadura e densidades de semeadura das variáveis: altura de planta (AP) final, diâmetro do colmo (DC) máximo, índice de área foliar (IAF) máximo e biomassa seca (BS) acumulada.

FV ¹	GL ²	AP	DC	IAF	BS
		Quadrados Médios			
Blocos	3	-	-	-	-
Épocas	3	1173,8*	0,38*	6,6*	30644651,9 ^{ns}
Resíduo (a)	9	227,8	0,05	0,48	26501607,7
Densidades	(3)	678,8*	1,10*	33,0*	492748283,4*
Regressão Linear	1	1576,9*	3,22*	98,7*	1339312451,9*
Regressão Quadrática	1	254,6 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,28 ^{ns}	133663099,1*
Regressão Cúbica	1	204,9 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,15 ^{ns}	5269299,1 ^{ns}
Densidades X Épocas	9	155,5 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,1*	7506904,0 ^{ns}
Resíduo (b)	36	212,1	0,03	0,3	19179490,2
Total	63	-	-	-	-
CV a (%)		7,7	10,9	16,4	29,2
CV b (%)		7,4	8,1	13,5	24,9
Média geral		196,5	2,0	4,2	17594,7

Notas: ^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; *Significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

Fonte: Autor (2015)

Não houve diferença significativa, ($p < 0,05$), para interação (E x D) de AP, DC e BS indicando que o efeito das épocas de semeadura independe das densidades de semeadura. A única variável de crescimento que apresentou interação significativa foi IAF, então o efeito das épocas dependeu da densidade de semeadura para esta variável. Os coeficientes de variação das parcelas e subparcelas das variáveis AP, DC e IAF apresentaram uma boa precisão experimental para pesquisa de campo (SCAPIM et al., 1995), enquanto que a BS,

apresentou um coeficiente moderadamente elevado, entretanto esse valor para pesquisa de campo é aceitável.

De acordo com o teste F, houve diferença significativa, no nível de 5% de probabilidade, para a regressão linear das variáveis AP e DC, indicando que a equação de 1º grau explica as variáveis em função das densidades de semeadura da cultura do milho, apenas para a biomassa seca a regressão quadrática foi significativa, ($p < 0,05$), indicando que a BS é mais bem explicada pela equação de 2º grau em função do tratamento quantitativo e não houve diferença significativa, no nível de 5% de probabilidade, para a regressão cúbica nenhuma das variáveis de crescimento (Tabela 4).

Verifica-se que a densidade de 125000 plantas por hectare apresentou redução na altura de planta e no diâmetro do colmo, entretanto para biomassa seca esta densidade apresentou uma elevada quantidade de fitomassa produzida comparando com outras densidades estudadas (37.500, 50.000 e 87.500 plantas por hectare). Os coeficientes de determinação para as variáveis, AP (77%), DC (97%) e BS (99%) mostra o quanto a equação explica a redução da altura e do diâmetro da planta e o aumento da fitomassa produzida em função das densidades de semeadura (Figura 21).

O efeito de épocas de semeadura das variáveis de crescimento foi comparado, ($p < 0,05$), pelo teste de média (Tukey), com exceção do índice de área foliar, pois a variável apresentou diferença significativa na interação entre épocas e densidades de semeadura, mostrando que o IAF da época é dependente da densidade de semeadura, o que faz necessário o desdobramento das épocas dentro de cada nível da densidade de plantas. A única variável de crescimento comparada que não apresentou diferença estatística entre o tratamento qualitativo foi biomassa seca aérea (Tabela 5).

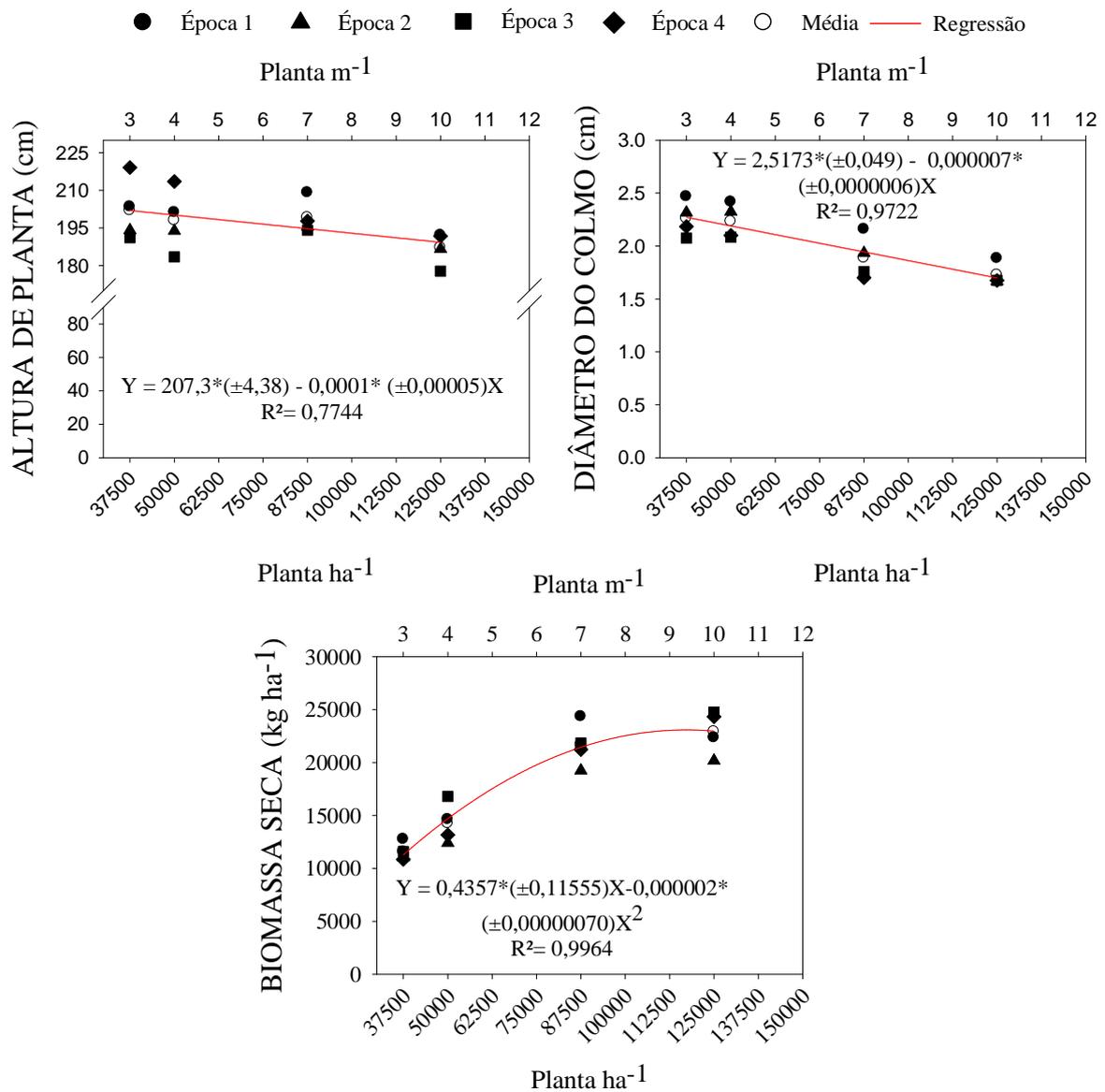
Tabela 5 - Efeito de épocas de semeadura na altura (cm), diâmetro do colmo (cm), índice de área foliar (IAF) e biomassa aérea (kg ha⁻¹) de milho (*Zea mays L.*). Rio Largo-AL, 2015.

Tratamentos	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Biomassa aérea (kg ha ⁻¹)
ÉPOCA 1	201,44 ab	2,23 a	18518,29 a
ÉPOCA 2	192,50 ab	2,06 ab	15718,41 a
ÉPOCA 3	186,58 b	1,89 b	18748,80 a
ÉPOCA 4	205,52 a	1,91 b	17393,57 a

Fonte: Autor (2015)

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

Figura 21- Regressão para altura de planta (AP), diâmetro do colmo (DC) e biomassa seca (BS), em função das densidades de semeadura do milho.



Fonte: Autor (2015)

Notas: ^{ns}parâmetro da equação não significativo, no nível de 5% pelo teste T; *parâmetro significativo ao nível de 5% pelo teste T

O índice de área foliar foi desdobrado entre as épocas de semeadura dentro das densidades de 37500, 50000, 87500 e 125000 plantas por hectares. Conforme o teste F, não houve diferença significativa, ($p < 0,05$), entre as épocas dentro da densidade 50000 e 37500 plantas por hectare, já épocas dentro das densidades 125.000 e 87.500 plantas por hectare, houve diferença significativa, no nível de 5% de probabilidade em relação ao índice de área foliar das plantas de milho (Tabela 6).

Tabela 6- Quadrados médios da análise do desdobramento dos efeitos de épocas de semeadura dentro de cada nível de densidades de semeadura para índice de área foliar (IAF).

FV ¹	GL ²	IAF
		Quadrados Médios
Épocas dentro da Densidade (125000) ³	3	0,619405*
Épocas dentro da Densidade (87500)	3	0,078346*
Épocas dentro da Densidade (50000)	3	3,028275 ^{ns}
Épocas dentro da Densidade (37500)	3	6,122509 ^{ns}
Erro	41	0,365077

Fonte: Autor (2015)

Notas: ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade; ³Plantas por hectare; ^{ns}Não significativo no nível de 5% de probabilidade; *significativo no nível de 5% de probabilidade.

Os resultados experimentais mostram que o índice de área foliar do milho para as densidades D3 e D4 foram estatisticamente iguais sob as diferentes épocas de semeadura estudadas. As densidades D1 e D2 apresentaram diferenças estatísticas entre as épocas de semeadura. Na D1 o IAF da E1 (7,43) foi superior e diferiu estatisticamente das demais épocas, nesta mesma densidade a E2 apresentou o menor IAF (4,44) e diferiu estatisticamente de todas as outras. O maior IAF (5,74) da D2 foi alcançado pela E1, mas não diferiu estatisticamente da E4 (5,12), já o menor valor de IAF para esta densidade foi observado pela E2 (3,73), porém não diferiu da E3 (4,43) Tabela 7.

Tabela 7 - Valores médios de índice de área foliar (IAF) máximo, das quatro épocas e quatro densidades de semeadura do milho (*Zea mays L.*). Rio Largo, 2013.

Tratamentos	Densidade ¹ (125000)	Densidade ² (87500)	Densidade ³ (50000)	Densidade ⁴ (37500)
Época 1	7,43a	5,74a	3,61 a	3,34 a
Época 2	4,44c	3,73c	3,36 a	2,49 a
Época 3	5,87b	4,43bc	3,28 a	2,54 a
Época 4	6,27b	5,12ab	3,44 a	2,72 a

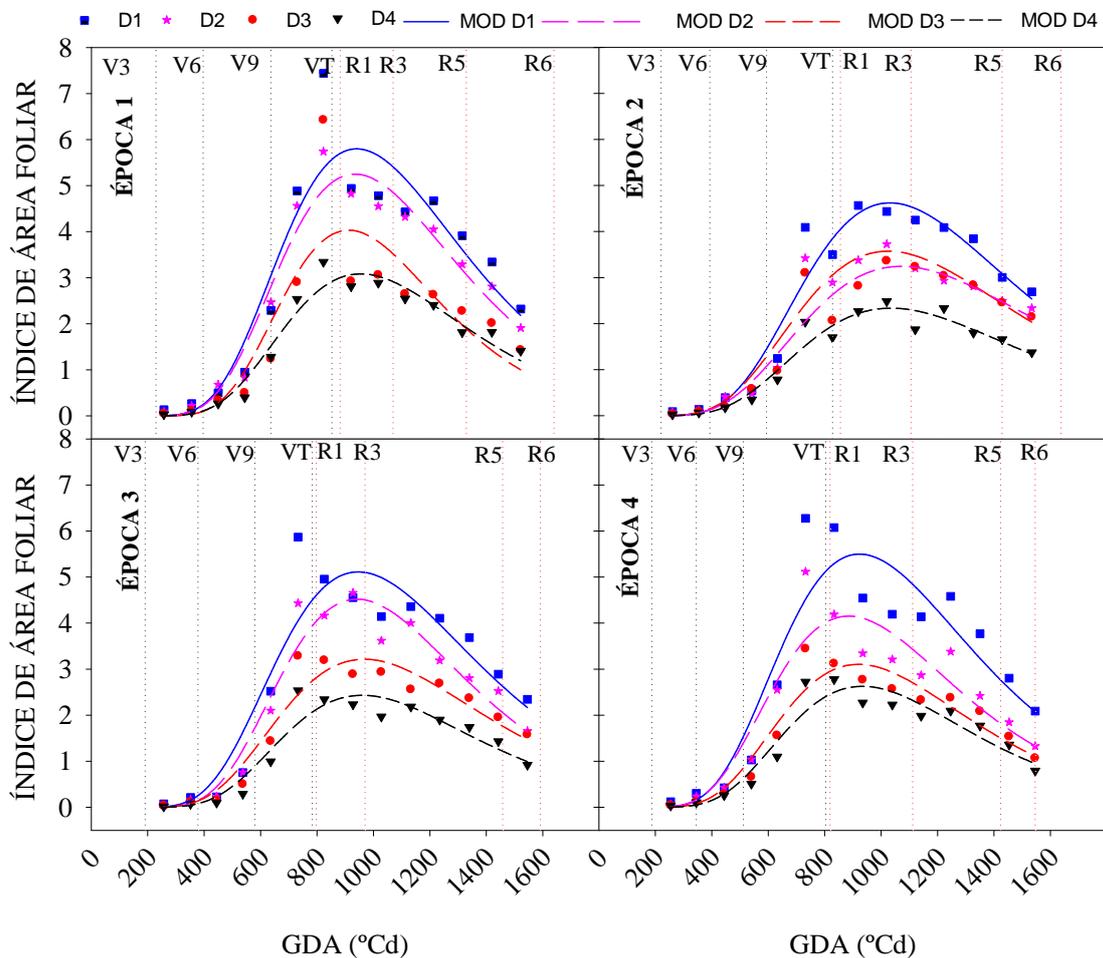
Fonte: Autor (2015)

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade. ¹D1=125000 plantas por hectare; ²D2=87500 plantas por hectare; ³D3=50000 plantas por hectare; ⁴D4=37500 plantas por hectare.

O índice de área foliar foi monitorado no decorrer do experimento, a partir de seis folhas expandidas (V6) até atingir o estágio de grãos farináceo-duro (R5) (Figura 22). De acordo com os dados observados as densidades da E1 atingiram o pico de IAF aos 833 GD, no último estágio de desenvolvimento da fase vegetativa (VT) e os valores foram iguais a 7,4; 5,7; 6,4 e 3,3 respectivamente para as densidades 1, 2, 3 e 4, o mesmo ocorreu nas E3 e E4. Em contrapartida os dados ajustados pelo modelo log-normal, todas as densidades atingiram o IAF máximo entre os estádios reprodutivo R1 e R3, aproximadamente aos 934 (E1); 1039

(E2); 953 (E3); 914 (E4) GD, valores definidos pela média das densidades de cada época, representado pelo parâmetro a2 do modelo log-normal (Tabela 8 e 9). Todos os parâmetros da equação do modelo para IAF apresentaram significância ($p < 0,05$), para o teste t. As equações geradas pelo o ajuste apresentaram elevados coeficientes de determinação ($R^2 > 0,80$), indicando o ótimo ajuste pelo o modelo empírico capaz de explicar a maior parte da variabilidade do IAF do milho.

Figura 22- Índice de área foliar (IAF) em função dos graus dias acumulado (GDA), nos estádios fenológicos vegetativos (V3, V6, V9, VT) e reprodutivos (R1, R3, R5 e R6) de plantas de milho para épocas e densidades de semeadura.



Fonte: Autor (2015)

Notas: Linha tracejada preta na vertical representa os estádios vegetativos e linha tracejada vermelha os estádios reprodutivos

Tabela 8- Parâmetros da equação, erro padrão de estimativa e coeficiente de determinação dos modelos logístico, log-normal e o de Boltzmann para as variáveis de altura de planta (AP), biomassa seca (BS), índice de área foliar (IAF) e diâmetro do colmo (DC) em função dos graus-dia acumulados para as densidades das épocas 1 e 2.

Variável	AP	BS	IAF	DC
Modelo	Logístico	Logístico	Log-normal	Boltzmann
Tratamento	Parâmetros			
E1D1	W0=3,28*(±0,39)	W0= 4,34*(±7,9)	a1=5,8* (±0,45)	A1= 0,48 (±0)
	Wf=202,6*(±5,04)	Wf= 19294,1*(±	a2=940,0* (±29,9)	A2=1,64* (±0,04)
	r=0,0069*(±0,0003)	921,8)	a3=0,34*(±0,04)	X0= 375.2*(±16.4)
	R ² =0,995	r= 0,79*(±0,0007)	R ² =0,872	dx= 39.1* (±15.1)
		R ² =0,996	R ² =0,884	
E1D2	W0=14,8*(±2,8)	W0= 3,74*(± 1,23)	a1=5,25*(±0,24)	A1= 0.4917 (±0)
	Wf=220,3*(±6,2)	Wf=16552,2*	a2=933,1*(±17,34)	A2= 1.84* (±0.05)
	r=0,0071*(±0,0003)	(± 1425,5)	a3=0,34*(±0,02)	X0= 374.9*(±21.1)
	R ² =0,994	r=0,0113*(±0,0007)	R ² =0,951	dx= 46.44* (±19.1)
	R ² =0,988		R ² =0,840	
E1D3	W0=3,25*(±0,5)	W0=2,16*(±0,78)	a1=4,02*(±0,54)	A1= 0.4667 (±0)
	Wf=214,5*(±7,0)	Wf=12554,5*	a2=910,99*(±44,11)	A2= 2.01* (±0.06)
	r=0,007*(±0,0004)	(±1224,7)	a3=0,31*(±0,05)	X0= 375.3*(±18.7)
	R ² =0,991	r=0,0115*(±0,0008)	R ² =0,71	dx= 41.4* (±17.1)
	R ² =0,985		R ² =0,860	
E1D4	W0=2,61*(±0,3)	W0=1,17*(±0,44)	a1=3,08*(±0,15)	A1=0,53 (±0)
	Wf=203,4*(±6,0)	Wf=9568,4*	a2=953,7*(±18,5)	A2=2,33* (±0,05)
	r=0,0072*(±0,0003)	(890,6±)	a3=0,33*(±0,02)	X0=409,9*(±14,7)
	R ² =0,994	r=0,012*(±0,0008)	R ² =0,948	dx=50,1* (±12,6)
	R ² =0,987		R ² =0,933	
E2D1	W0=3,25* (±0,6)	W0=8,07 ^{ns} (±3,82)	a1=4,62* (±0,22)	A1= 0,53 (±0)
	Wf=195,8*(±8,70)	Wf=16494,0*	a2=1031,3* (±23,70)	A2= 1,53* (±0,03)
	r=0,0067*(±0,0005)	(±2463,7)	a3=0,36*(±0,02)	X0= 380,8*(±18,3)
	R ² =0,985	r=0,0094*(±0,0009)	R ² =0,945	dx= 20,81 (±12,7)
	R ² =0,968		R ² =0,916	
E2D2	W0=14,8*(±2,8)	W0=8,07 ^{ns} (±3,82)	a1=3,57*(±0,20)	A1= 0,49 (±0)
	Wf=203,7*(±7,5)	Wf=16494,0*	a2=1023,6*(±28,83)	A2= 1,72* (±0,03)
	r=0,0069*(±0,0004)	(±2463,7)	a3=0,38*(±0,03)	X0= 395,7*(±12,2)
	R ² =0,990	r=0,0094*(±0,0009)	R ² =0,925	dx= 29,25* (±7,6)
	R ² =0,968		R ² =0,942	
E2D3	W0=3,0*(±0,57)	W0=4,18 ^{ns} (±2,09)	a1=3,24*(±0,19)	A1= 0,53 (±0)
	Wf=210,0*(±8,9)	Wf=15624,1*	a2=1069,0*(±35,7)	A2= 2,15* (±0,04)
	r=0,0069*(±0,0005)	(±2428,8)	a3=0,4***(±0,04)	X0= 432,8*(±12,3)
	R ² =0,987	r=0,0101*(±0,001)	R ² =0,920	dx= 41,7* (±11,5)
	R ² =0,970		R ² =0,947	
E2D4	W0=2,62*(±0,37)	W0=2,55 ^{ns} (±1,18)	a1=2,33*(±0,12)	A1= 0,5417 (±0)
	Wf=203,4*(±6,0)	Wf=10042,6*	a2=1033,7*(±26,63)	A2= 2,17* (±14,4)
	r=0,0072*(±0,0003)	(1634,7±)	a3=0,37*(±0,03)	X0= 429,9*(±11,1)
	R ² =0,994	r=0,0096*(±0,0009)	R ² =0,934	dx= 32,28* (±10,9)
	R ² =0,972		R ² =0,949	

Fonte: Autor (2015)

Notas: *Significativo a p<0,05 pelo teste t;

^{ns}Não significativo pelo teste t

Tabela 9 - Parâmetros da equação, erro padrão de estimativa e coeficiente de determinação dos modelos logístico, log-normal e o de Boltzmann para as variáveis de altura de planta (AP), biomassa seca (BS), índice de área foliar (IAF) e diâmetro do colmo (DC) em função dos graus-dia acumulados para as densidades das épocas 3 e 4.

Variável	AP	BS	IAF	DC
Modelo	Logístico	Logístico	Log-normal	Boltzmann
Tratamento	Parâmetros			
E3D1	W0=3,80* (±0,7)	W0=5,79 ^{ns} (±2,67)	a1= 5,1* (±0,37)	A1=0,56 (±0)
	Wf=192,5*(±7,3)	Wf=16754,0*	a2= 946,2*	A2= 1,56* (±0,04)
	r=0,0069*(±0,0005)	(±1951,1)	(±31,1)	X0= 349,7* (±17,4)
	R ² =0,986	r=0,011***(±0,001)	a3= 0,37*(± 0,03)	dx= 33,9* (±20,8)
		R ² =0,976	R ² =0,88	R ² =0,974
E3D2	W0=3,59*(±0,5)	W0=6,07 ^{ns} (±2,86)	a1= 4,51*(±0,23)	A1= 0,52 (±0)
	Wf=196,5*(±5,5)	Wf=16253,4*	a2= 940,9*(±	A2= 1,6* (±0,04)
	r=0,0072*(±0,0004)	(±2263,7)	19,7)	X0= 359,9* (±15,4)
	R ² =0,992	r=0,0101*(±0,001)	a3= 0,34*(± 0,02)	dx= 34,3 (±17,2)
	R ² =0,972	R ² = 0,94	R ² =0,867	
E3D3	W0=4,42*(±0,66)	W0=1,68 ^{ns} (±0,92)	a1= 3,21*(±0,19)	A1= 0,62 (±0)
	Wf=192,78*(±5,5)	Wf=11283,0*	a2= 966,7*(±	A2= 1,89* (±0,04)
	r=0,0068*(±0,0004)	(±1540,7)	25,6)	X0= 359,9* (±15,7)
	R ² =0,991	r=0,0122*(±0,0012)	a3= 0,37*(±0,03)	dx= 45,6* (±14,8)
	R ² =0,971	R ² =0,92	R ² =0,900	
E3D4	W0=3,43*(±0,5)	W0=1,90 ^{ns} (±1,09)	a1= 2,43*(±0,16)	A1= 0,53 (±0)
	Wf=200,78*(±6,6)	Wf=8157,9*	a2= 959,3*(±	A2= 1,90* (±0,03)
	r=0,0069*(±0,0004)	(±1229,1)	26,5)	X0= 396,0*(± 12,9)
	R ² =0,991	r=0,0113*(±0,0012)	a3= 0,35*(± 0,03)	dx= 44,79* (±10,7)
	R ² =0,965	R ² =0,91	R ² =0,941	
E4D1	W0=4,46* (±0,5)	W0=8,83 ^{ns} (±4,71)	a1= 5,5* (±0,45)	A1= 0,67 (±0)
	Wf=206,6*(±4,3)	Wf=16227,3*	a2= 923,2*	A2= 1,49* (±0,03)
	r=0,0068*(±0,0003)	(±1841,8)	(±32,7)	X0= 344,2* (±2,1E7)
	R ² =0,996	r=0,0115*(±0,0013)	a3= 0,36*(±0,04)	dx= 4,1* (±7,31E7)
	R ² =0,966	R ² =0,86	R ² =0,832	
E4D2	W0=4,7*(±0,5)	W0=6,63 ^{ns} (±4,18)	a1= 4,15*(±0,34)	A1= 0,76 (±0)
	Wf=210,5*(±4,7)	Wf=11973,9*	a2= 884,5*(±	A2= 1,65* (±0,03)
	r=0,0069*(±0,0003)	(±1573,8)	31,0)	X0= 344,6* (±1,2E7)
	R ² =0,994	r=0,0116*(±0,0015)	a3= 0,36*(± 0,03)	dx= 4,13* (±7,3E7)
	R ² =0,954	R ² =0,86	R ² =0,838	
E4D3	W0=4,0*(±0,5)	W0=3,98 ^{ns} (±1,96)	a1=3,1*(±0,20)	A1= 0,65(±0)
	Wf=224,8*(±5,3)	Wf=10154,9*	a2= 918,7*(±	A2= 2,0* (±0,03)
	r=0,0073*(±0,0003)	(±1124,7)	25,0)	X0= 341,2* (±8,6)
	R ² =0,994	r=0,0116*(±0,0011)	a3= 0,36*(±0,03)	Dx=26,5* (±15,1)
	R ² =0,973	R ² =0,91	R ² =0,930	
E4D4	W0=3,7*(±0,3)	W0=2,05 ^{ns} (±1,01)	a1= 2,62*(±0,17)	A1= 0,88(±0)
	Wf=224,7*(3,8±	Wf=8793,6*	a2=932,5*(±25,18	A2= 2,1* (±0,03)
	r=0,0073*(±0,0002)	(±938,4))	X0= 358,0* (±12,0)
	R ² =0,997	r=0,0125*(±0,0011)	a3= 0,35*(±0,03)	dx= 39,0* (±11,8)
	R ² =0,976	R ² =0,87	R ² =0,932	

Fonte: Autor (2015)

Notas: *Significativo a $p < 0,05$ pelo teste t;

^{ns}Não significativo pelo teste t

Normalmente a cultura do milho atingir o IAF máximo ao final da fase vegetativa (VT), pois a partir deste momento o consumo de fotoassimilados produzido pela fotossíntese é cessado para a expansão e alongamento celular, se após o estágio de florescimento (R1) a planta consumir os produtos da fotossíntese com o crescimento pode ocorrer redução no

rendimento de grãos. O ideal seria após o florescimento a partição dos carboidratos fosse destinados a espiga e enchimento de grãos. Lyra et al. (2010) encontraram IAF máximo com acúmulo variando entre 850 GD a 900 GD, para a variedade BR106, em três anos de estudos (2000, 2001 e 2002), na região dos tabuleiros costeiros de Alagoas. França et al. (1999) corroboram com essa pesquisa e encontraram IAF máximo de 5,8 em cultivo irrigado e ocorreu com acúmulo de 853 GD, no estágio de pendramento, para uma população de aproximadamente 70 mil plantas por hectare, já em cultivo de sequeiro o acúmulo de graus-dia foi superior (1187 GD), e ocorreu no estágio de enchimento de grãos. Entretanto, os dados estimados, o tratamento irrigado atingiu o IAF máximo (5,5) com o acúmulo de 1187 GD, no estágio de grão leitoso. Ferreira Júnior et al. (2014a) encontraram valores máximo de IAF em torno de 63 dias após o plantio. Em pesquisa realizada em Rio Grande do Sul, Kunz et al., (2007), registraram o acúmulo de 1086 °Cd para as plantas atingirem o IAF máximo (5,3) em cultivo irrigado, com espaçamento entrelinhas de 0,8 m, já em cultivo com espaçamento de 0,4 m o máximo IAF (5,2) foi atingido com o acúmulo de 951GD.

Resultados semelhantes a essa pesquisa também foram encontrados por Maddonni, Otegui e Cirilo (2001) na Argentina, em estudos de híbridos e arranjos espaciais de plantas, na densidade de 120.000 plantas ha⁻¹ no espaçamento de 0,7 m, o IAF máximo variou entre 6,58 e 8,19, densidades de 90.000 plantas ha⁻¹, entre 4,63 a 6,84 e para densidade de 30.000 plantas ha⁻¹ o IAF máximo variou de 2,19 a 2,72. Gardiol et al., (2003) observaram diferença de quase 70% no índice de área foliar máximo para as densidades de 22.000 e 91.000 plantas por hectare. De acordo com Lauer et al. (2004) o IAF entre 4 e 5 , no florescimento é o suficiente para otimizar o desempenho agrônômico do milho. Sangoi et al. (2011) registraram resultados diferentes em sua pesquisa, e seus resultados mostram que o IAF foi afetado pelo efeito de densidade de plantas, em que os maiores IAF total foram observados na menor densidade de plantas (30.000 pl ha⁻¹), entretanto quando ele considerou o IAF do colmo principal aumentou linearmente com o incremento da população.

O índice de área foliar das épocas de plantio apresentou quatro fases de evolução. A fase lenta (VE até V6) ocorreu o acúmulo de 396, 393, 378 e 345 GD, para as épocas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A fase de crescimento rápido (V6 até V12) que acumulou até 742 (E1), 717 (E2), 678 (E3) e 646 (E4) GD. A terceira fase de evolução foi a fase de estabilização que ocorreu até o IAF alcançar o valor máximo (V12 a R2). A última fase que foi marcada pelo início do decréscimo do IAF até as plantas atingirem o R6 (Figura 22). O decréscimo no índice de área foliar ocorreu mais ou menos após o R2 quando as plantas atingiram o valor máximo de IAF. No início do crescimento o milho apresenta aumento exponencial do IAF,

linear e positivo até o último estágio vegetativo (VT), seguido da variação linear negativa até a senescência das folhas (MULLER et al., 2005).

A queda do IAF é provocada pela senescência das folhas inferiores das plantas que pode ser causado pelo sombreamento das folhas superiores. A competição intraespecífica entre as plantas provoca escassez dos recursos naturais (água, nutrientes e luz), limitam o desempenho fotossintético e aumenta a mobilização interna de reserva das folhas mais velha para as folhas mais novas, causando a senescência foliar. O decréscimo natural após o nível máximo de IAF foi observado por Kunz et al. (2007), a queda mais acentuada, após o pico do IAF ocorreu no espaçamento de 0,40 m, e os autores atribuíram a senescência das folhas basais causada pelo auto-sombreamento. Corroborando com essas pesquisas Borrás et al., (2003) verificaram que a senescência das folhas sempre é maior nos cultivos em que o espaçamento é reduzido ou em altas densidades de semeadura.

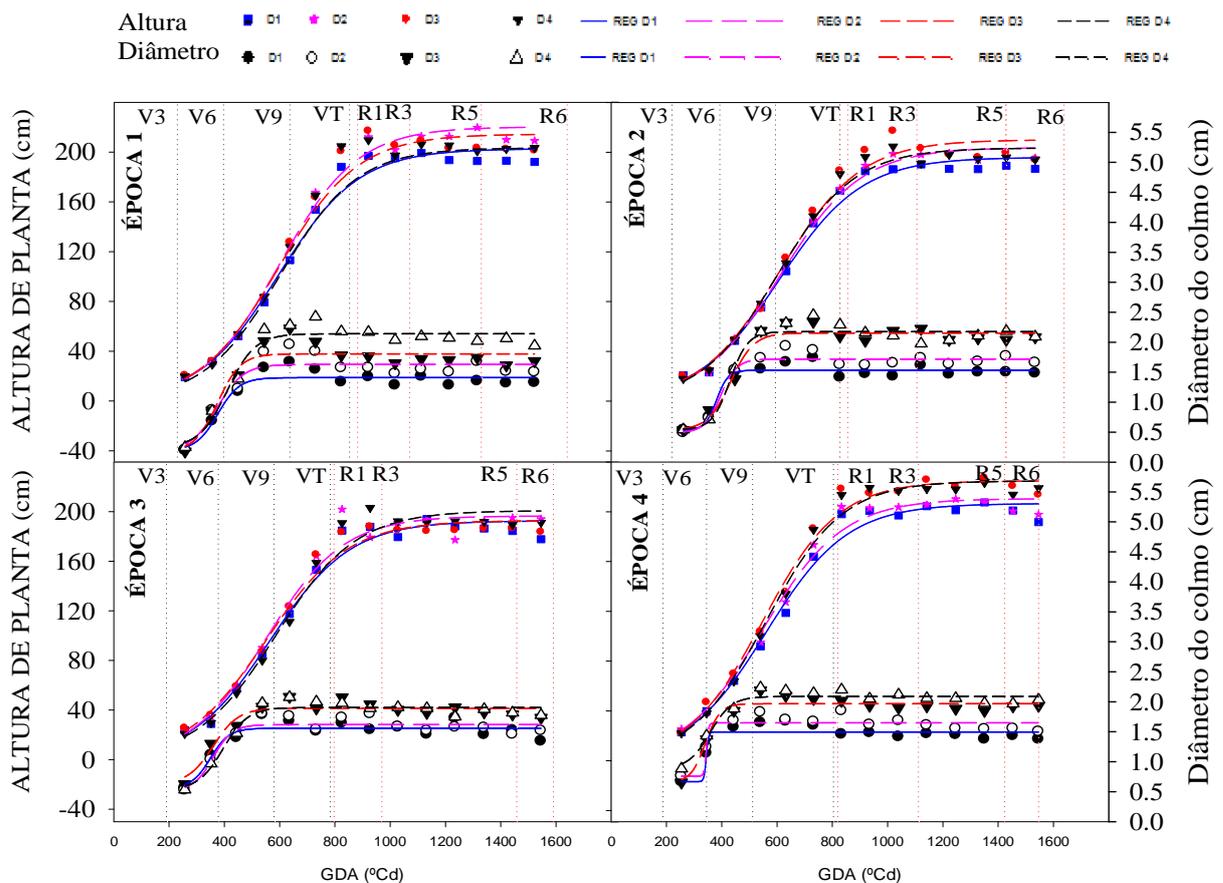
No estudo realizado por Sangoi et al. (2011), o milho atingiu o IAF crítico na fase de floração. O período em que o milho alcança o pico de índice de área foliar entre R1 e R3 é um dos períodos mais críticos para cultura, pois é quando a cultura encontra-se com o máximo de folhas que dependendo do arranjo espacial e das condições abióticas pode afetar a determinação de absorção de radiação fotossintética total, a fotossíntese, a transpiração e o acúmulo de biomassa seca (PEARCE et al., 1967; LIETH; REYNOLDS, 1984; MOCK; PEARCE, 1975). O pico do IAF nos estádios reprodutivos pode provocar uma menor produção no rendimento de grãos, pois a planta pode consumir os fotoassimilados para expansão celular, ao invés de utilizar no enchimento de grãos. Segundo Lyra et al. (2010), após a cultura do milho atingir o IAF máximo a partição de fotoassimilados se destinava principalmente a formação das espigas e o enchimento de grãos.

O crescimento em altura em função dos graus-dia acumulados foi muito variado dentro das densidades de semeadura, apenas a semeadura mais adensada (D1) apresentou o mesmo comportamento em todas as épocas (menor altura) e causou redução na linha tendência da regressão, isso pode ter ocorrido devido ao aumento da competição entre as plantas, estas começaram a sofrer limitações fisiológicas com implicação na altura da planta (Figura 23).

Ao final do estágio vegetativo as maiores plantas das épocas 1, 2, 3 e 4, atingiram a altura de 191 (D2); 174 (D3); 164 (D2) e 192 cm (D3). De modo geral a partir do estágio R2 as plantas tenderam a estabilização no crescimento da altura. As maiores alturas ao final do ciclo da cultura (R6) foram alcançadas pelas densidades 2, 3, 4 e 3, respectivamente para as épocas 1, 2, 3 e 4 (Figura 23). De acordo com o teste de Tukey, no nível de 5%, a E4 apresentou a maior altura do dossel (205,5 cm), porém não diferiu estatisticamente da E1 e

E2, enquanto que a E3 apresentou a menor altura (186,6 cm), mas também não diferiu das E1 e E2 e diferiu da E4 (Tabela 5). De acordo com os dados estimados pelo modelo logístico as maiores alturas, representada pelo parâmetro w_f , foram encontradas pela D3, com exceção da E3 que apresentou maior altura para D4. Os dados de altura para épocas de semeaduras estimadas apresentaram tendência similar aos dados observado, onde a E4 apresentou a maior altura da planta (224,8 cm), enquanto que a E3 apresentou a menor altura (192,5 cm). Os parâmetros do modelo foram todos significativos ($p < 0,05$), pelo teste t. o modelo apresentou elevados valores de coeficientes de determinação ($R^2 > 0,95$), indicando boa representação da altura das plantas em épocas e densidades de plantas (Tabela 8 e 9). Lyra et al. (2010) encontraram variação de 1,6% entre os dados observado e estimado para altura de planta de milho, com o modelo logístico.

Figura 23- Altura de planta (AP) e diâmetro do colmo em função dos graus dias acumulado (GDA), nos estádios fenológicos vegetativos (V3, V6, V9, VT) e reprodutivos (R1, R3, R5 e R6) de plantas de milho para épocas e densidades de semeadura.



Fonte: Autor (2015)

Notas: Linha tracejada preta na vertical representa os estádios vegetativos e linha tracejada vermelha os estádios reprodutivos

A estabilização da altura e o pico do IAF no estágio fenológico R2 fica evidenciado que a planta cessa o gasto de fotoassimilados com divisão e expansão celular necessária para o crescimento e concentra o consumo para enchimento dos grãos, a fase de rápido crescimento da cultura ocorreu entre os estádios V6 e VT, que dependendo da época quanto aos fatores abióticos esse período pode levar mais ou menos tempo.

Maddonni; Otegui e Cirilo (2001), corroboram com essa pesquisa e afirmam que híbrido mais adensado apresentou altura de planta menor comparado com a semeadura menos adensada. Takasu et al. (2013) em relação a altura de plantas observaram o ajuste linear decrescente a medida que houve aumento da população de plantas, possivelmente devido a maior competição intra-específica do híbrido por água, nutrientes e radiação solar para as maiores populações de plantas. Gardiol et al. (2003) em experimento realizado em Buenos Aires, não encontrou diferença significativa entre as alturas das plantas em duas densidades (22 e 91 mil pl ha⁻¹). Dourado Neto et al. (2003) não observaram efeito do arranjo espacial para altura de plantas quando foram submetida nas densidades de semeadura entre 30.000 e 60.000 pl ha⁻¹.

Entretanto diversos autores (ALVAREZ et al., 2006; GROSS et al., 2006; FARINELLI, PENARIOL; FORNASIERI FILHO, 2012; SILVA et al., 2014) encontram resultados diferentes, altas densidades populacional de plantas apresentaram maior altura de planta, a justificativa relatada é que a competição por luz induz o estímulo da dominância apical resultando em maior crescimento da cultura, porém neste trabalho, essa tendência foi observada no tratamento com a densidade de 87.500 plantas ha⁻¹. As hipóteses levantadas são de que no cultivo mais denso (125.000 pl ha⁻¹) ocorreu auto sombreamento das folhas devido a arquitetura foliar mais aberta e pode ter ocorrido limitação nutricional.

O diâmetro do colmo foi inversamente proporcional a população de plantas e sua estabilização ocorreu no estágio vegetativo de nove folhas expandidas (V9), após a estabilização na E2 e E3, D4 e D3 foram praticamente iguais. A média geral das densidades mostra que a E1 apresentou o maior diâmetro do colmo (2,23 cm), mas não diferiu estatisticamente da E2, enquanto que a E3 apresentou o menor DC (1,89 cm), porém não diferiu das épocas 2 e 4 (Figura 23 e Tabela 5). A competição entre as plantas por radiação solar, assimilação do CO₂, nutrientes, água e ate mesmo espaço para se desenvolver pode ter colaborado para a população mais adensada apresentar o menor diâmetro de colmo em todas as épocas analisadas. As desvantagens dos cultivos mais adensados é a formação de um ambiente bastante favorável ao desenvolvimento e a incidência de fungos e doenças que provoca apodrecimento do colmo, altas taxas de acamamento e quebraimento de colmo

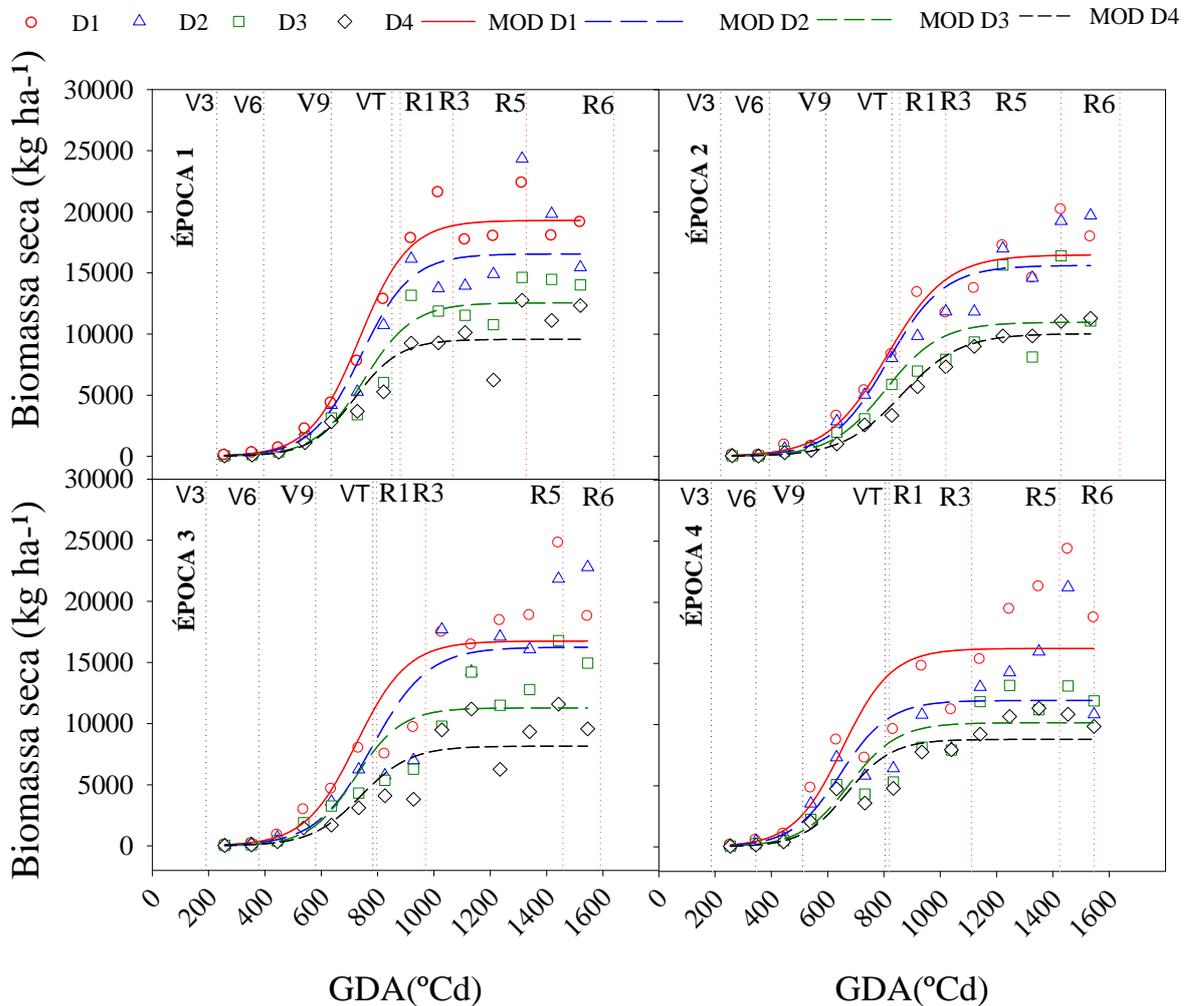
(ALMEIDA et al., 2000; ARGENTA et al., 2001b; SANGOI, 2000; GROSS et al., 2006). A redução no diâmetro do colmo com o aumento populacional de plantas de milho tem sido observada por diversos autores (DEMETRIO et al., 2008; KAPPES et al, 2010; FARINELLI, PENARIOL; FORNASIERI FILHO, 2012; SILVA et al., 2014).

O acúmulo de biomassa ao longo do ciclo ocorreu em função dos graus-dia acumulados, na primeira fase o acúmulo tem característica lenta e compreende da emergência da plântula (VE) a nove folhas expandidas (V9), após esse período as plantas iniciam um rápido acúmulo de biomassa, a qual depende da oferta de energia térmica. Na E1 o rápido crescimento ocorreu entre o estágio vegetativo V9 até o pendoamento (VT), já nas épocas 1, 2 e 3 foi de V9 até o estágio reprodutivo R2. Logo após esse período a cultura atingiu o valor máximo de biomassa e estabilizou. A produção de biomassa estabilizou para as épocas 1 e 4, no estágio R3, aos 1069 e 1112 GD, enquanto que nas épocas 2 e 3 só foram estabilizar quando as plantas acumularam 1298 e 1293°Cd no estágio grão farináceo (R4). O intervalo entre R3 e R5 foi maior nas épocas E2 e E3.

De acordo com a análise de variância para o tratamento qualitativo, não houve diferença estatística, no nível de 5% de probabilidade para épocas de semeadura (Figura 24 e Tabela 4). Os resultados do modelo ajustado mostraram que a densidade com maior número de plantas (D1) apresentou o maior acúmulo de BS (19294,1 kg ha⁻¹), as densidades D2, D3 e D4 apresentaram valores decrescentes iguais a 16552,2; 12554,5 e 9568,4 kg ha⁻¹, na mesma ordem, para a E1, parâmetro wf para biomassa (Tabela 8 e 9). O tratamento quantitativo apresentou uma regressão de segundo grau e indicou que o cultivo mais adensado (125000 pl ha⁻¹) mostrou aumento significativo na produção de matéria seca pela curva de regressão, indicando o efeito da densidade de plantas na produção de biomassa. A população de plantas que apresentou máxima produção de biomassa seca (23729,3 kg ha⁻¹) foi estimada por 108925 plantas por hectare (Figura 21).

Dourado Neto et al. (2003) corroboram com essa pesquisa, e relatam que o aumento da população de 30 mil para 90 mil plantas por hectare provocou diminuição na massa seca do sistema radicular e aumento na matéria seca da parte aérea, e explica que esse foi o motivo pelo qual, a população com elevado número de plantas por hectare apresentou maior porcentagem de colmos quebrados e acamados. Quando a população foi triplicada a produção de biomassa seca por unidade de planta reduziu, porém a produção por unidade de área aumentou em 82%.

Figura 24- Biomassa seca em função dos graus dias acumulado (GDA), nos estádios fenológicos vegetativos (V3, V6, V9, VT) e reprodutivos (R1, R3, R5 e R6) de plantas de milho para épocas e densidades de semeadura.



Fonte: Autor (2015)

Notas: Linha tracejada preta na vertical representa os estádios vegetativos e linha tracejada vermelha os estádios reprodutivos

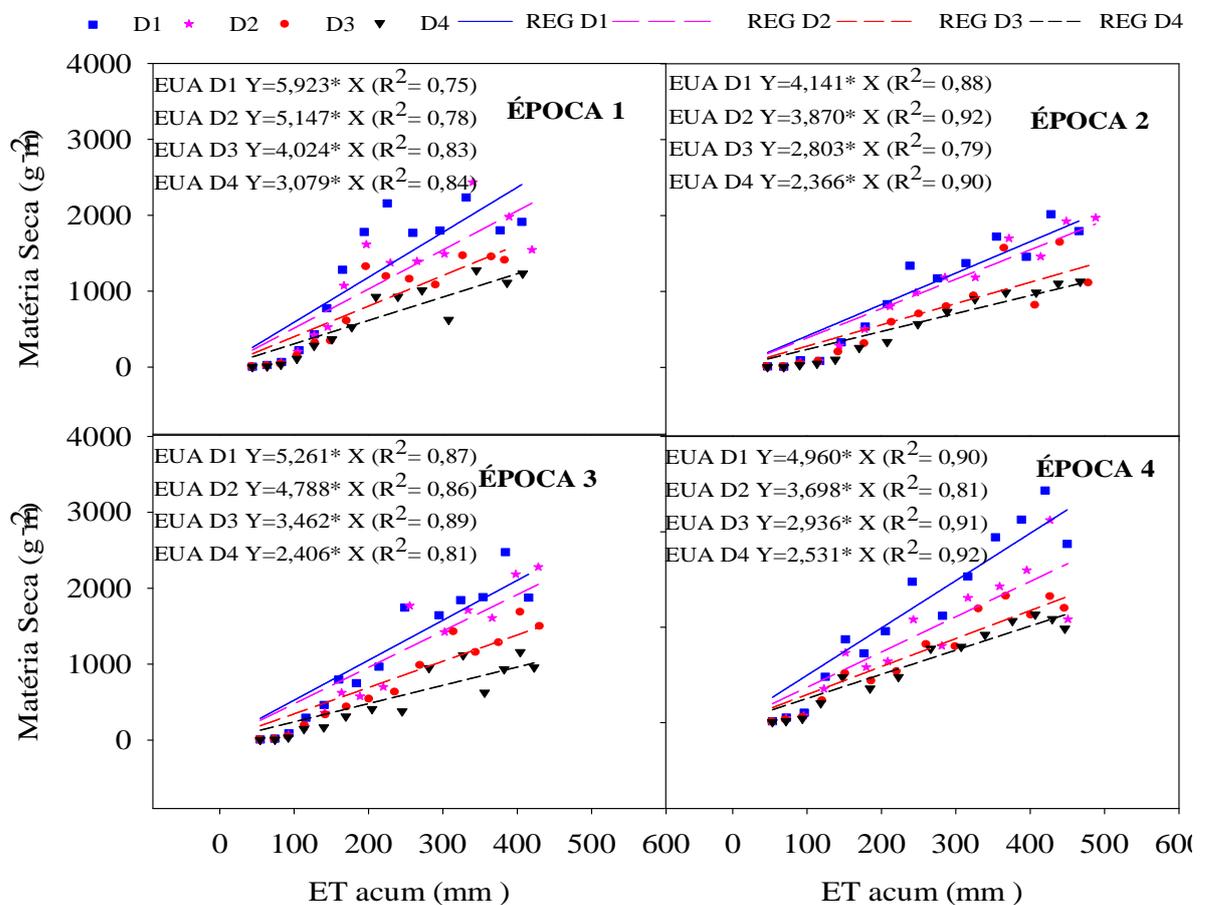
Francis et al. (1999) corroboram com essa pesquisa e afirma que o acúmulo de biomassa seca é semelhante em tratamentos distintos até 408 GD, o rendimento máximo de biomassa atingido foi da ordem de 28662 kg ha⁻¹ para cultivo irrigado e 18015 kg ha⁻¹ para cultivo em sequeiro, ambos com a população aproximadamente com 70 mil plantas por hectare, o acúmulo de graus-dia foi da ordem de 1724 e 1861 GD, respectivamente. Porém para a cultura atingir a maturação fisiológica foi necessário 1976 (126 DAE) e 2098 GD (133 DAE), para tratamento irrigado e sequeiro respectivamente. O acúmulo de graus-dia para a cultura completar o ciclo explica o motivo pelo qual a região Sul do Brasil apresenta maior produção de matéria seca e rendimento de grãos de que o Nordeste brasileiro. Isso ocorre devido a menor quantidade de energia térmica diária acumulada pela cultura o que faz

necessária aumento na duração do ciclo para completar a constante termica para o milho chegar na maturação fisiológica.

4.5 Eficiência no uso da água

A eficiência no uso da água para produção de biomassa seca (EUA) representada pela reta indica que quanto menos inclinada for a reta significa que o acúmulo de matéria seca foi menor em relação a absorção de água, com isso a eficiência no uso da água se torna menor, como ocorreu na D4 em todas as épocas estudadas. A EUA foi decrescente a partir das densidades 1, 2, 3 e 4, ou seja a semeadura mais adensada proporcionou uma conversão mais eficiente de consumo de água em biomassa produzida (Figura 25).

Figura 25- Relação entre acúmulo de matéria seca (g m^{-2}), e evapotranspiração potencial acumulada (mm) e a regressão linear forçada a passar pela origem, em que a eficiência no uso da água (EUA) é o coeficiente angular da reta, para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha^{-1}), (D2, 87500 pl ha^{-1}), (D3, 50000 pl ha^{-1}) e (D4, 37500 pl ha^{-1}).



Fonte: Autor (2015)

Notas: *(coeficientes significativos a 5% de probabilidade de erro, pelo teste t); REG: Regressão linear

Não houve diferença significativa, ($p < 0,05$), entre épocas de semeadura em relação à eficiência no uso da água para rendimento de biomassa seca (EUA) e eficiência no uso da água para rendimento de grãos (EUAg) e também para a interação E x D, não houve diferença significativa ($p < 0,05$), indicando que não há efeito das épocas de semeadura sobre as EUA e EUAg independente das densidades de semeadura. (Tabela 10). Medeiros (2009) observou o mesmo resultado e seus valores de EUA variaram de 3,76 a 4,28 g L⁻¹.

O tratamento quantitativo das variáveis EUA e EUAg apresentaram diferença significativa apenas para regressão linear, no nível de 5% de significância. A regressão linear para EUA em função das densidades de semeadura explica em 98,52% a EUA. A D1(5,09 g L⁻¹) apresentou uma elevação na EUA, enquanto que a D4 (2,76 g L⁻¹) causou um declínio na EUA (Figura 26 e Tabela 10). A E1 obteve a maior eficiência no uso da água para rendimento de biomassa seca (4,12 g L⁻¹), enquanto que a E2 apresentou a menor EUA (3,50 g L⁻¹), entretanto as épocas analisadas não apresentaram diferença estatística pelo teste de Tukey a ($p < 0,05$) (Tabelas 11).

Tabela 10- Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de épocas de semeadura e densidades de semeadura para eficiência no uso da água para rendimento de biomassa seca (EUA) e para rendimento de grãos (EUAg).

FV ¹	GL ²	EUA	EUAg
		Quadrados Médios	
Blocos	3	-	-
Épocas	3	1,10 ^{ns}	0,09 ^{ns}
Resíduo (a)	9	0,41	0,04
Densidades	(3)	17,69*	0,30*
Regressão Linear	1	52,29*	0,67*
Regressão Quadrática	1	0,76	0,03 ^{ns}
Regressão Cúbica	1	0,02	0,21*
Densidades X Épocas	9	0,51 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Resíduo (b)	36	0,32	0,02
Total	63		
CV a (%)		16,55	16,11
CV b (%)		14,60	12,86
Média geral		3,86	1,19

Fonte: Autor (2015)

Notas: ^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F;

*Significativo a $p < 0,05$ pelo teste F;

¹Fonte de variação;

²Graus de liberdade.

Tabela 11- Efeito de épocas de semeadura na eficiência no uso da água para produção de biomassa (EUA, g L⁻¹) e para produção de grãos (EUAg, g L⁻¹) de milho (*Zea mays L.*). Rio Largo-AL, 2013.

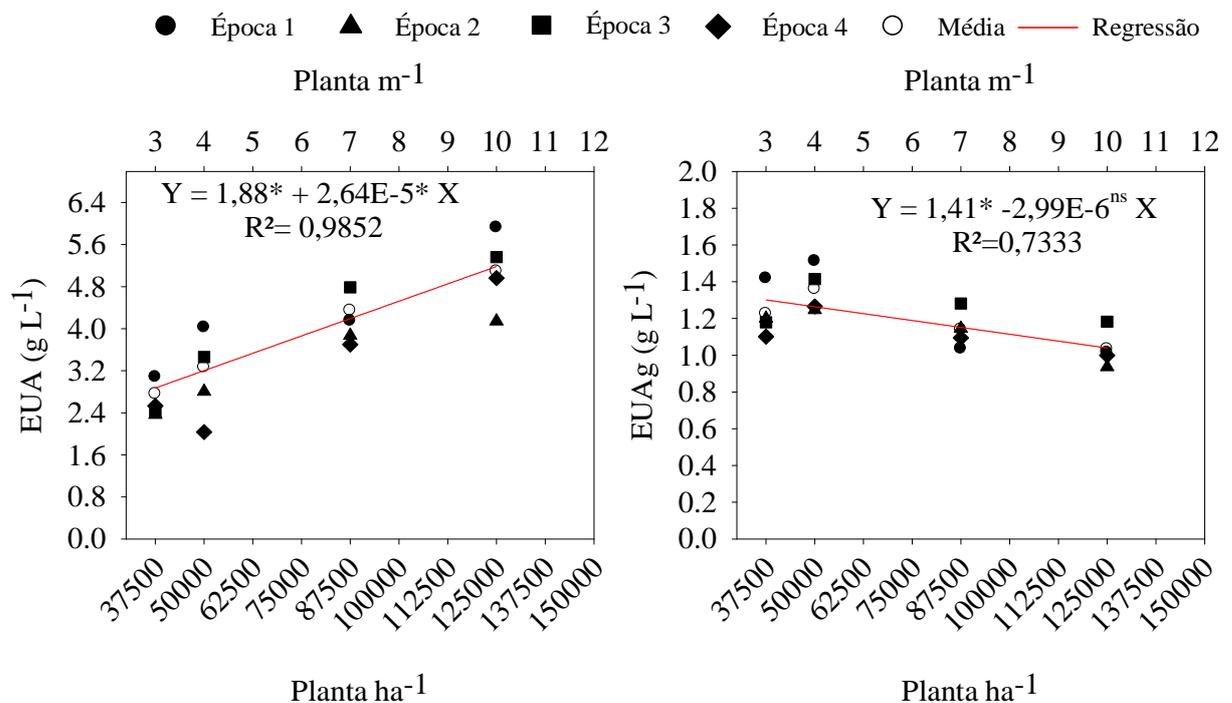
Tratamentos	EUA (g L ⁻¹)	EUAg (g L ⁻¹)
ÉPOCA 1	4,12 a	1,24 a
ÉPOCA 2	3,50 a	1,13 a
ÉPOCA 3	3,92 a	1,26 a
ÉPOCA 4	3,91 a	1,11 a

Fonte: Autor (2015)

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

Nyakudya e Stroosnijder (2014) utilizando simulações com Aquacrop, encontraram valores de eficiência no uso da água para rendimento de biomassa de 3,56 g L⁻¹ para menor densidade de plantas (17500 plantas ha⁻¹) e 5,72 g L⁻¹ para cultivos mais adensados (44400 plantas ha⁻¹). A EUAg apresentou comportamento totalmente inverso a eficiência no uso da água para produção de biomassa seca, em que a D1(1,03g L⁻¹) foi a apontada pela diminuição da eficiência no uso de água para rendimento de grãos e a D3(1,35g L⁻¹) apresentou a maior EUAg. A regressão linear explica em 73% a eficiência no uso da água para rendimento de grãos, em função das densidades de semeadura (Figura 26 e Tabela 12).

Figura 26- Regressão linear para eficiência no uso da água para rendimento de grãos (EUAg) e eficiência no uso da água para rendimento de biomassa seca aérea (EUA), em função das densidades de semeadura do milho.



Fonte: Autor (2015)

Notas: *Coeficientes significativos a 5% de probabilidade, pelo teste t

A E3 apresentou a maior eficiência no uso da água para rendimento de grãos (1,26 g L⁻¹) e foi superior em 10% a E4 (1,11 g L⁻¹) que obteve a menor EUAg, mas de acordo com teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, as épocas são semelhantes, pois os tratamentos qualitativos não apresentaram diferença estatística entre eles.

Tabela 12- Valores de rendimentos de grãos (RG), irradiação interceptada acumulada (Hf_I acum), evapotranspiração total (ET), eficiência o da água para rendimento de grãos (EUAg) e eficiencia no uso da radiação para rendimento de grãos para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha⁻¹), (D2, 87500 pl ha⁻¹), (D3, 50000 pl ha⁻¹) e (D4, 37500 pl ha⁻¹).

DENSIDADES	ÉPOCA 1				
	RG (g m ⁻²)	Hf_I acum (MJ m ⁻²)	ET (mm)	EURg (g MJ ⁻¹)	EUAg (g L ⁻¹)
D1	442,94	543,58	436,78	0,81	1,01
D2	465,62	563,98	449,65	0,83	1,04
D3	602,18	475,55	398,41	1,27	1,51
D4	604,57	480,80	426,52	1,26	1,42
DENSIDADES	ÉPOCA 2				
D1	468,91	517,20	500,91	0,91	0,94
D2	598,14	522,34	522,25	1,15	1,15
D3	640,92	509,86	514,11	1,26	1,25
D4	589,17	450,10	491,02	1,31	1,20
DENSIDADES	ÉPOCA 3				
D1	501,47	533,07	424,09	0,94	1,18
D2	558,46	537,46	435,69	1,04	1,28
D3	618,50	486,36	437,18	1,27	1,41
D4	503,76	437,15	427,14	1,15	1,18
DENSIDADES	ÉPOCA 4				
D1	449,28	542,06	449,67	0,83	1,00
D2	493,10	531,52	450,70	0,93	1,09
D3	565,33	468,62	446,89	1,21	1,27
D4	491,84	450,30	446,70	1,09	1,10

Fonte: Autor (2015)

De acordo com Zwart e Bastiaanssen (2004), valores médios de eficiência no uso da água para rendimento de grãos é igual a 1,8 g L⁻¹, para o cultivo do milho irrigado. Kang, Shi e Zhang (2000) encontraram valores superiores ao dessa pesquisa, em estudo realizado na china, valores de EUAg variando de 2,1 a 3,4 g L⁻¹. Barbieri et al., (2012) observaram aumento da eficiência no uso da água para rendimento de grãos de 17%, no tratamento que apresentava as plantas mais distribuída, os tratamentos que apresentavam deficiência de água e nitrogênio o incremento ainda foi maior. Zhang et al., (2014) pesquisando EUAg em diferentes manejos, encontraram valores com uma grande amplitude tanto para EUAg (0,28 a 3,90 g L⁻¹) quanto para rendimento de grãos (1,12 a 14,6 Mg ha⁻¹). Os autores atribuíram essa

variação a mudança na evaporação do solo, na evapotranspiração total e no uso da água antes e depois do embonecamento. Mas a EUAg média de todas as práticas foi de $2,1 \text{ g L}^{-1}$.

Os resultados acima de $2,0 \text{ g L}^{-1}$ confirmam que diferentes manejos agrícolas podem aumentar a eficiência no uso da água. Nyakudya e Stroosnijder (2014) encontraram valores contrastante ao dessa pesquisa, em que valores elevados de EUAg ($2,8 \text{ g L}^{-1}$) foi observado para cultivos mais adensados, enquanto que o cultivo menos adensado apresentou menor EUAg ($1,6 \text{ g L}^{-1}$). O motivo pelo qual os autores encontraram tendência diferente em resposta a densidade de plantas é explicado pelo fato que a variedade utilizada nesse experimento não é adaptada a altas densidades de plantas, provocando redução no rendimento de grãos e posteriormente na eficiência de água para rendimento de grãos. Se o rendimento de grãos para a cultura aumentasse proporcionalmente ao aumento da densidade de plantas, a pesquisa atingiria valores superiores a média encontrada por Zwart e Bastiaanssen, (2004). A elevada eficiência no uso da água encontrada por diversos autores (ZWART; BASTIAANSSEN, 2004; KANG et al. 2000; BARBIERI et al., 2012; ZHANG et al., 2014) esta associada a elevada produtividade de grãos atingida em áreas favorável ao cultivo do milho, devido a condições climática (temperatura do ar, fotoperíodo, radiação solar e chuva) e o uso de híbridos adaptado a altas densidades.

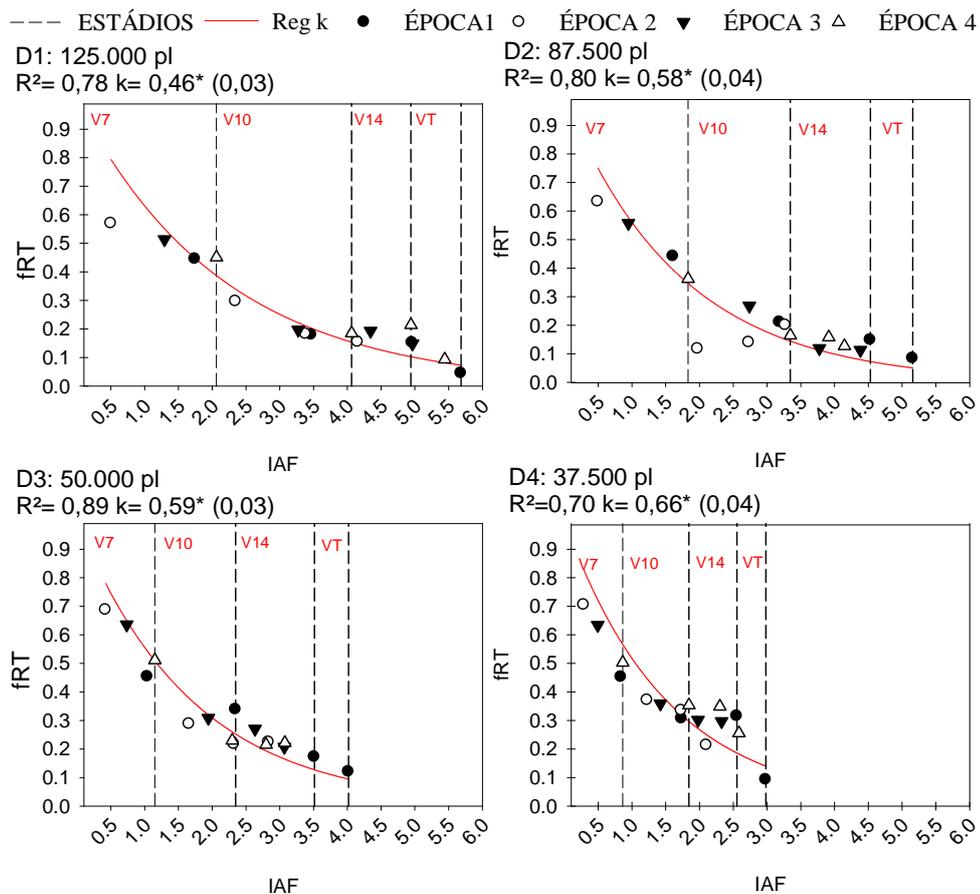
4.6 Coeficiente de extinção de luz

A fração de irradiância transmitida na D1 em V7 foi no máximo de 60%, com IAF de 2,0, enquanto que as demais densidades transmitiram 70% da luz incidente, em V7 e o IAF variou de 0,8 (D4) a 1,8 (D2) Figura 27.

A irradiância transmitida no dossel do milho diminuiu com o aumento do índice de área foliar. No final do estágio de pendramento (VT) a fração de luz transmitida variava entre 4 a 10% da irradiância incidente sobre o dossel das plantas. Os coeficientes angulares da regressão exponencial entre a fração da radiação transmitida e o índice de área foliar representa o coeficiente de extinção de luz médio para o cultivo das densidades 1, 2, 3 e 4 equivalente a 0,46; 0,58; 0,59 e 0,66, na mesma ordem e erro padrão da estimativa (EPE) igual a 0,03; 0,04; 0,03 e 0,04, respectivamente. Deste modo, o k para as densidades D2 e D3 foram significativamente iguais, pois o EPE sobrepõe o k das densidades, considera-se que a arquitetura das D2 e D3 é igual. Os coeficientes de determinação apresentaram ajustes satisfatórios para os k, em função das densidades ($R^2 > 0,70$). De acordo com o teste t todos os coeficientes foram significativos, a 5% de probabilidade de erro (Figura 27). No arranjo

espacial menos adensado a radiação é transmitida com maior intensidade, pois o índice de área foliar fica pouco distribuído nas entrelinhas de plantio. Assim o cultivo mais adensado aproveita mais a radiação incidente e diminui a fração transmitida de radiação.

Figura 27. Relação entre a fração de irradiância transmitida (fRf_T), pelo índice de área foliar (IAF) e o coeficiente de extinção de luz (k), estimado por regressão exponencial para as densidades de semeadura (D1, 125000 pl ha⁻¹), (D2, 87500 pl ha⁻¹), (D3, 50000 pl ha⁻¹) e (D4, 37500 pl ha⁻¹).



Fonte: Autor (2014)

Notas: *coeficientes significativos a 5% de probabilidade de erro, pelo teste t;

Valor entre o parêntese representa o erro padrão da estimativa (EPE).

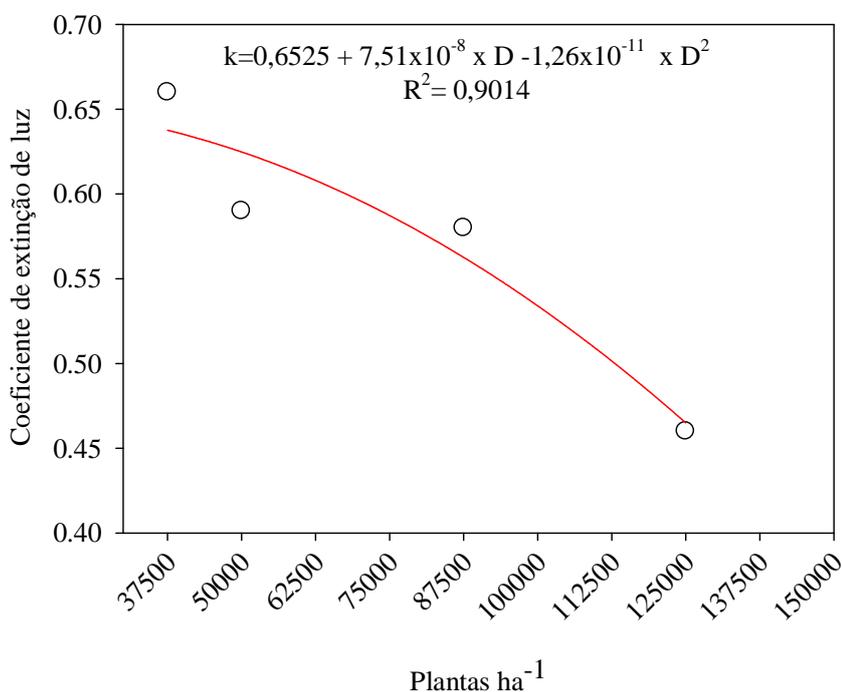
Os resultados obtidos por Detomini et al. (2008) corroboram com essa pesquisa e afirmam que entre os estágios V4 e R1 foi observado um rápido desenvolvimento do IAF, concomitantemente a um rápido declínio na transmitância, nesse período, devido o pico do IAF, entre VT e R3. O coeficiente de extinção de luz médio estimado para o experimento com a população de 66 mil plantas ha⁻¹, variou entre 0,43 e 0,45 para os tratamentos utilizados e de acordo com os autores, os menores valores de k resultam numa distribuição da radiação incidente por maior área foliar, o que proporciona maiores taxas de fotossíntese.

Os valores de k acima de 0,60 correspondem a variedades de milho com folhas disposta horizontalmente, com arquitetura foliar mais aberta. Linquist et al. (2005) encontraram valores de coeficiente de extinção de luz (0,67) similares a essa pesquisa, no período de enchimento de grãos. Maddonni e Otegui (1996), em pesquisa realizada com híbridos contrastante, numa densidade de 70000 plantas ha^{-1} , mostraram que o coeficiente de extinção de luz variou entre 0,46 e 0,64 para diferentes tipos de híbridos, em três locais distintos. Os maiores valores de k foi observado por híbrido com arquitetura foliar mais horizontal, enquanto que o híbrido com as folhas mais eretas apresentou menor k . Tohidi et al. (2012), calculou o coeficiente de extinção de luz para cinco híbridos e três níveis de nitrogênio, na região semi-árida do Iran e registrou valores de k variando de 0,56 a 0,60, respectivamente para o maior e menor nível de nitrogênio e uma variação ainda maior (0,52 a 0,69) para os híbridos testados.

O cultivo mais denso (125.000 plantas por hectare) proporcionou menor k , enquanto que o cultivo com 37500 plantas por hectare provocou um aumento acentuado da curva (Figura 28). A equação apresentou coeficiente de determinação satisfatório ($R^2=0,90$). O coeficiente de extinção de luz encontrado neste trabalho serve como ferramenta para ser utilizado em modelos mecanístico que utiliza a interceptação de luz, de variedades com dossel mais aberto, baseado no k e IAF. Maddonni, Otegui e Cirilo (2001) determinaram o coeficiente de extinção de luz por equações exponenciais na região da Argentina e encontrou valor igual a 0,55 para densidade de 9 plantas m^{-2} e índice de área foliar máximo de 6, entretanto as densidades de 3 e 12 plantas por m^{-2} os autores encontraram valores diferentes ao dessa pesquisa. Isso pode ser devido a diferentes características de dossel de híbridos utilizado, ou seja, o tratamento pode ter afetado a distribuição e crescimento das folhas dos híbridos, através de mudanças morfológicas nas folhas antes da competição por radiação.

Borrás, Maddonni e Otegui (2003) obteve resultados semelhante a Maddonni, Otegui e Cirilo (2001) e encontraram valores de coeficiente de extinção de luz crescente em função da densidade de plantas. Monsi e Saeki (2005) mostram em seus resultados que o coeficiente de extinção para as folhas horizontais idealmente distribuídos é 1,0, enquanto para as folhas, com menor ângulo de inclinação na inserção da folha, diminui para 0,44.

Figura 28- Relação entre o coeficiente de extinção de luz (k) e a densidade de plantas por hectare (D) de milho.



Fonte: Autor (2015)

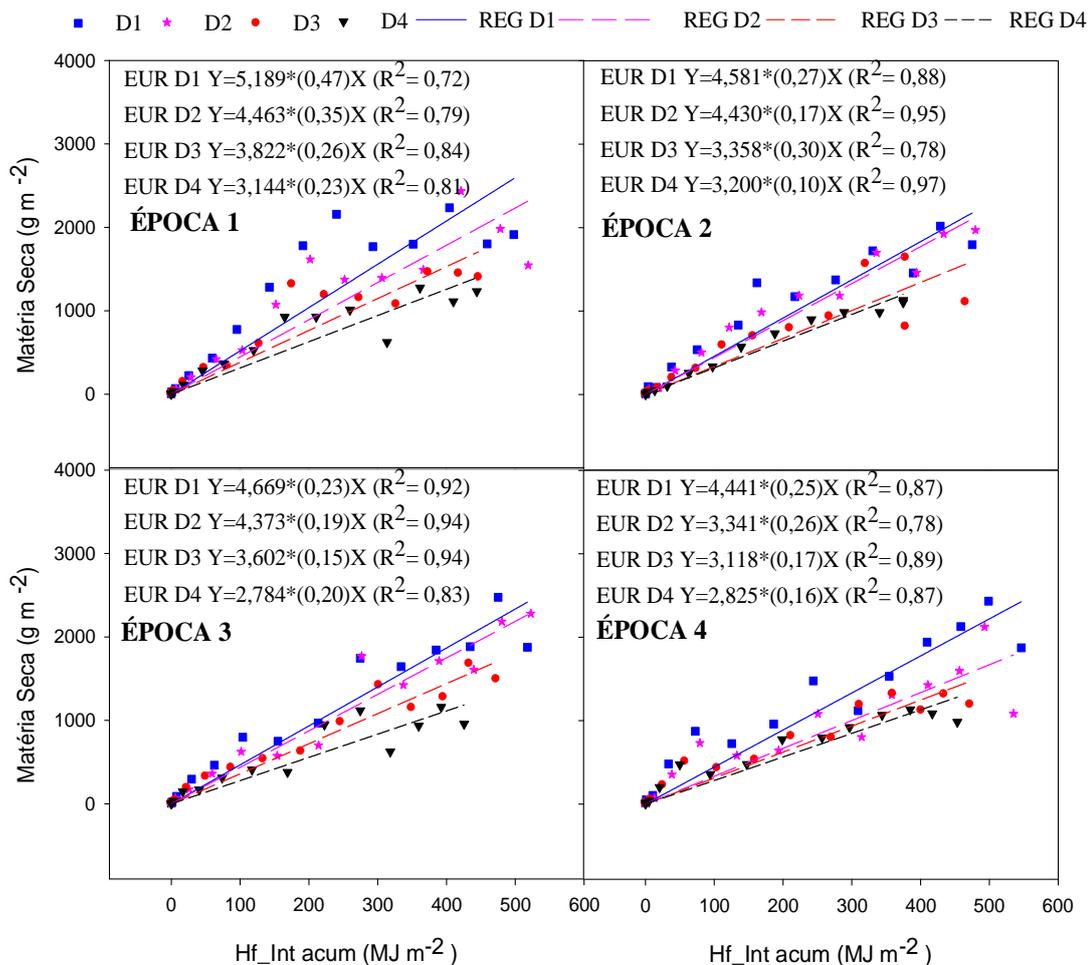
Müller e Bergamaschi (2005) também encontraram resultados contrastantes, e afirmam que os menores valores de k são encontrados pelo tratamento que é menos eficiente na interceptação de híbrido devido às características de folhas mais eretas e de menor tamanho que reduzem a capacidade de interceptação de luz entre as suas camadas de folhas. Porém os autores explica que isso ocorre devido a densidade populacional de plantas e/ou espaçamento entrelinhas não ajustado.

A arquitetura foliar mais ereta em cultivo adensado intercepta mais e compete menos por radiação solar. Deste modo, fica evidenciado que a estrutura do dossel vegetativo das plantas, densidade populacional e tipos de híbridos de milho modificam a interceptação de luz no dossel da cultura. Os genótipos com a estrutura foliar mais ereta submetida a altas densidades de plantas, possibilita maior aproveitamento e menor competição da radiação incidente em cima do dossel. E assim, quanto maior o coeficiente de extinção de luz, menor é a fração de radiação interceptada pela estrutura foliar, nesta condição, em função do adensamento das plantas.

4.7 Eficiência no uso da radiação

A eficiência no uso da radiação para rendimento de biomassa (EUR) foi crescente, nas épocas de semeadura, de acordo com o aumento da densidade de plantas, entretanto as épocas apresentaram valores variados de EUR (Figura 29), motivo que pode ser explicado pela quantidade de energia radiante que chega à superfície e a qualidade dessa energia. A quantidade e qualidade da luz e a densidade de plantas pode alterar a distribuição das folhas permitindo um melhor aproveitamento e conversão em biomassa.

Figura 29. Relação entre acumulo de matéria seca (g m^{-2}), e irradiação fotossinteticamente interceptada acumulada (MJ m^{-2}) e a regressão linear forçada a passar pela origem, em que a eficiência no uso da radiação (EUR) é o coeficiente angular da reta, para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha^{-1}), (D2, 87500 pl ha^{-1}), (D3, 50000 pl ha^{-1}) e (D4, 37500 pl ha^{-1}).



Fonte: Autor (2015)

Notas: *coeficientes significativos a 5% de probabilidade de erro, pelo teste t;

Valor entre o parêntese representa o erro padrão da estimativa (EPE);

REG: Regressão linear

A D3 apresentou maior eficiência no uso da radiação fotossinteticamente ativa para rendimentos de grãos (EURg), enquanto que a D1, apresentou a menor conversão de energia fotossinteticamente interceptada em produção de grãos (Tabela 12). De acordo com o teste F, não houve diferença significativa a 5% de precisão, para EUR e EURg, entre as épocas de semeadura e na interação entre épocas x densidades, indicando que a eficiência no uso da radiação para produção de biomassa e de grãos (EUR e EURg), independe da densidade de plantas. Os coeficientes de variação apresentaram boa precisão experimental, tanto para EUA quanto para EURg (Scapim et al., 1995) (Tabela 13).

Tabela 13- Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de épocas de semeadura e densidades de semeadura das variáveis: eficiência no uso da água para rendimento de biomassa (EUA) e eficiência para rendimento de grãos (EURg).

FV ¹	GL ²	EUR	EURg
		Quadrados Médios	
Blocos	3	-	-
Épocas	3	0,93ns	0,06ns
Resíduo (a)	9	0,34	0,03
Densidades	(3)	9,74*	0,49*
Regressão Linear	1	28,69*	1,36*
Regressão Quadrática	1	0,44 ^{ns}	0,002 ^{ns}
Regressão Cúbica	1	0,09 ^{ns}	0,12 ^{ns}
Densidades X Épocas	9	0,27 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Resíduo (b)	36	0,25	0,01
Total	63		
CV a (%)		15,21	15,27
CV b (%)		13,04	11,63
Média geral		3,83	1,08

Fonte: Autor (2015)

Notas: ^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; *Significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

A E1 obteve a maior eficiência no uso da radiação para produção de biomassa ($4,09 \text{ g MJ}^{-1}$), enquanto que a E4 apresentou o menor valor ($3,71 \text{ MJ m}^{-1}$), entretanto as épocas não apresentaram diferenças estatísticas entre si, pelo teste de Tukey, a 5%. Para EURg, as épocas também não apresentaram diferenças estatísticas, pelo teste de Tukey, ($p < 0,05$), mas a E2 apresentou o maior valor ($1,15 \text{ g MJ}^{-1}$) e uma diferença de cerca de 15% da E4, que apresentou o menor valor ($1,01 \text{ g MJ}^{-1}$) (Tabela 14). A elevada eficiência no uso da radiação para a cultura do milho esta associada ao alto ponto de saturação de luz e a maior captura de CO₂ em altas temperaturas, devido a grande eficiência da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase, na fixação do CO₂, nas células do feixe da bainha, enquanto que a enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase oxigenase está presente nas células do mesofilo foliar impossibilitada de exercer a função oxigenase.

Tabela 14- Efeito de épocas de semeadura na eficiência no uso da água para produção de biomassa (EUA, g L⁻¹) e para produção de grãos (EUAg, g L⁻¹) de milho (*Zea mays L.*). Rio Largo-AL, 2013.

Tratamentos	EUR (g MJ ⁻¹)	EUR (g MJ ⁻¹)
ÉPOCA 1	4,09 a	1,05 a
ÉPOCA 2	3,56 a	1,15 a
ÉPOCA 3	3,96 a	1,10 a
ÉPOCA 4	3,71 a	1,01 a

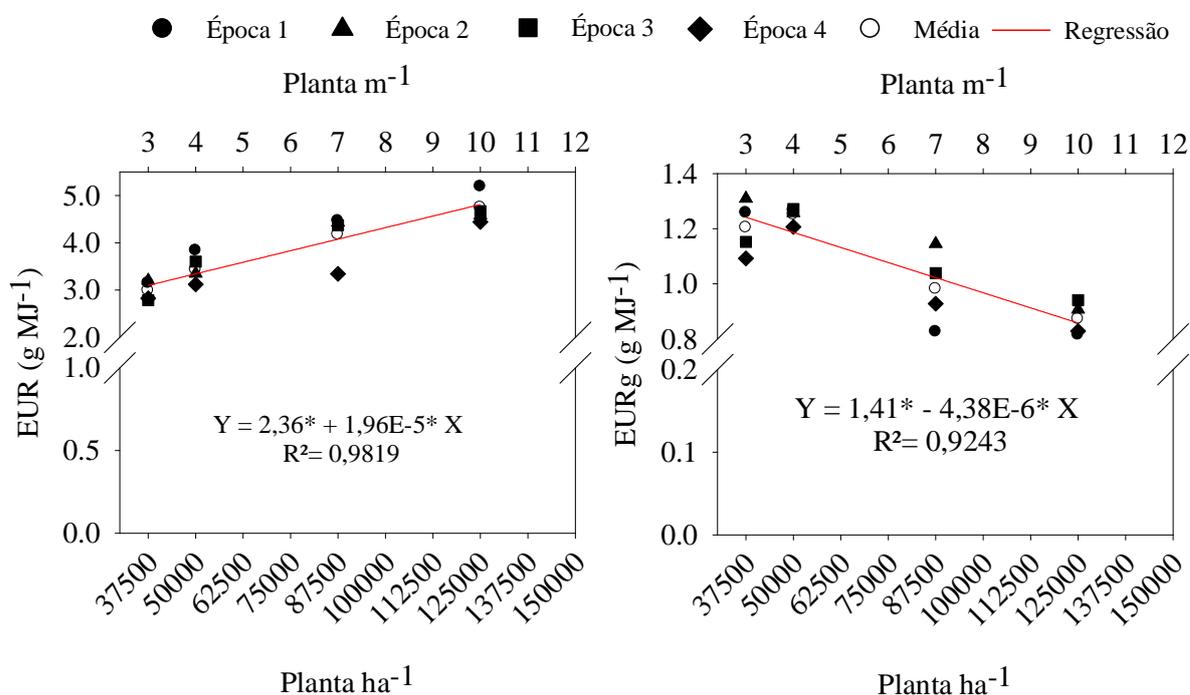
Fonte: Autor (2015)

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

As densidades de plantas apresentaram diferença significativa, ($p < 0,05$) pelo teste F, apenas para a regressão linear, indicando que a equação de 1º grau explica a característica da eficiência no uso da radiação para produção de biomassa e para a produção de grãos (EUR e EURg) em função do aumento da densidade de plantas. Observa-se que a D1 (125000 plantas ha⁻¹) causou um aumento na EUR (4,74 g MJ⁻¹), enquanto que a D4 (37500 plantas ha⁻¹) provocou redução na EUR (2,98 g MJ⁻¹). O efeito da densidade de plantas na EUR foi totalmente oposto para EURg, a D3 (50000 plantas ha⁻¹) foi responsável pelo o aumento da eficiência no uso da radiação para produção de grãos (1,25 g MJ⁻¹) e a semeadura mais adensada (D1) causou declínio na reta (0,87 g MJ⁻¹). O valor de R² explica 98,2% o aumento da EUR com o aumento da densidade de plantas e 92,4% o declínio da EURg, em função do aumento da densidades de plantas (Figura 30).

O efeito do aumento da população provocou aumento no IAF da densidade e maior interceptação da radiação solar. O arranjo espacial entre as plantas pode ter provocado mudança na distribuição das folhas para o melhor aproveitamento da radiação solar e conversão em biomassa ou até mesmo pela grande quantidade de plantas na área, entretanto, esse efeito foi negativo para produção de grãos, pois o aumento da densidade de plantas provocou maior competição entre as elas e pode ter causado limitação fisiológica, e ter comprometido a conversão em produção de grãos (MUNDSTOCK, 1977). De acordo com Kunz et al. (2007), as plantas estressadas podem absorver a mesma quantidade de radiação solar que plantas não estressada, porem a taxa fotossintética e a conversão em rendimento é menor.

Figura 30. Regressão linear para eficiência no uso da radiação para rendimento de grãos (EURg) e eficiência no uso da radiação para rendimento de biomassa seca aérea (EUA), em função das densidades de semeadura do milho.



Fonte: Autor (2015)

Notas: *Coeficientes significativos a 5% de probabilidade, pelo teste t,

Ferreira Junior et al. (2014a) encontraram valor semelhante a essa pesquisa (eficiência no uso da radiação máximo de 3,85 g MJ⁻¹), com uma variedade da EMBRAPA (BR 106), para uma população de 62500 plantas ha⁻¹. Kunz et al. (2007) corroboram os resultados do presente trabalho e encontraram valores de eficiência no uso da radiação de 3,2 g MJ⁻¹, para cultivos com 70000 pl ha⁻¹, em condições irrigadas e espaçamento entrelinhas de 0,8 m. Quando os autores diminuíram o espaçamento entrelinha para 0,4 m a eficiência no uso da radiação aumentou (4,0 g MJ⁻¹), assim concluíram que, numa mesma densidade houve aumento da eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa com redução do espaçamento entrelinhas, devido a distribuição mais equidistante entre as plantas, além disso, podem permitir a melhor arquitetura foliar, favorecendo a interceptação da radiação fotossintética.

França et al. (1999) obteve valor de 2,6 g MJ⁻¹ para uma população de 67 mil plantas por hectare. Valores entre 2,5 a 2,8 g MJ⁻¹ foram encontrado para a cultura do sorgo e na média de 2,2 para outras culturas (girassol, arroz e trigo) (MUCHOW; DAVIS, 1988; KINIRY et al., 1989).

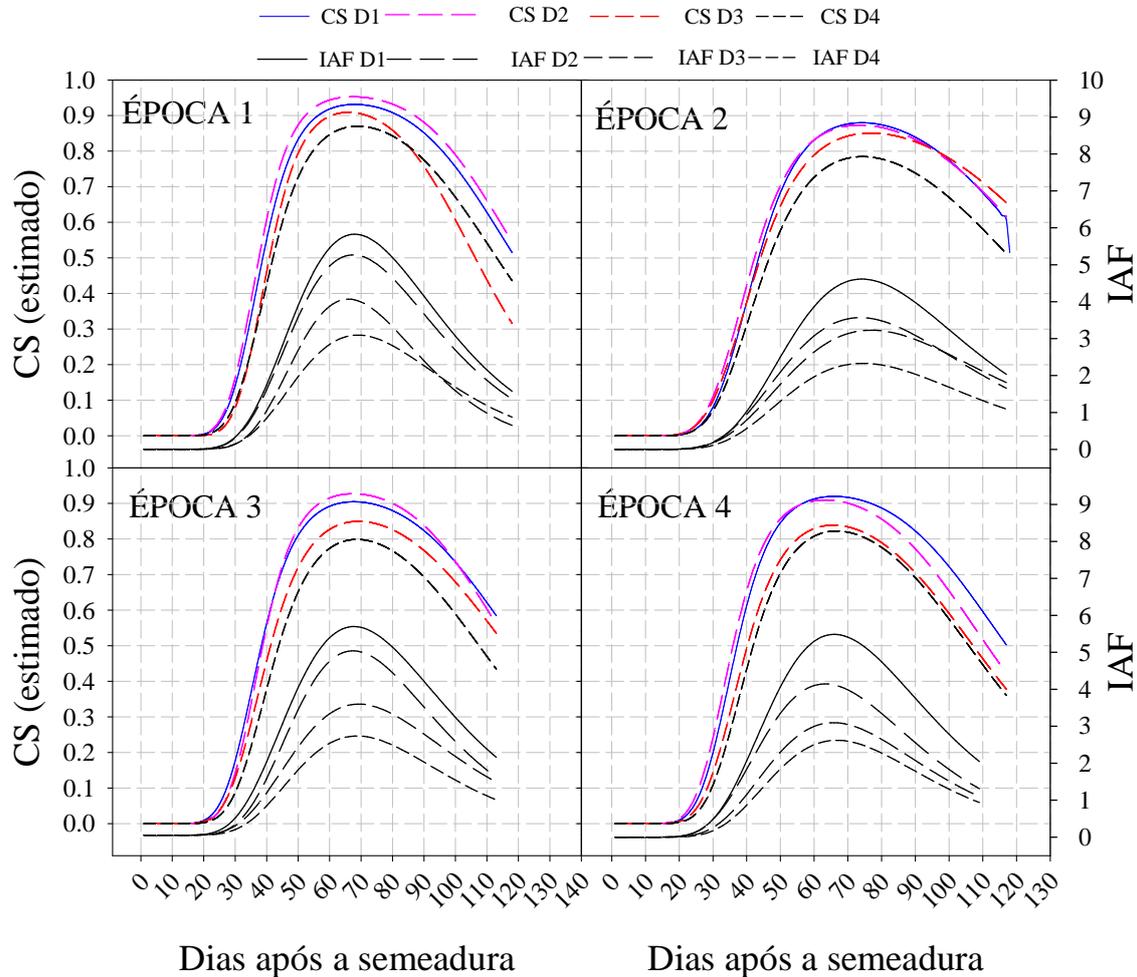
Cirilo e Andrade (1994) corroboram com essa pesquisa e mostram valores de até 4,2 g MJ⁻¹ em período de maior radiação solar. Valores semelhantes foram encontrados para a cultura do milho (BONHOMME et al., 1982; MUCHOW & DAVIS, 1988; KINIRY et al., 1989). A eficiência no uso da radiação para o milho esta na ordem de 2,5 até 4,6 g MJ⁻¹ dependendo da densidade populacional de plantas e da arquitetura foliar do dossel. As culturas de metabolismo C4 (cana-de-açúcar, milho e panicum) apresentam valores similares para eficiência no uso da radiação (GOSSE et al., 1986).

4.8 Cobertura do solo (CS)

A cobertura do solo diária foi estimada através da fração da irradiação interceptada, em função de dias após a semeadura (DAS) e apresentou a mesma tendência do índice de área foliar (Figura 31). De acordo com a classificação de Allen et al. (1998), a cultura apresenta 4 fases de crescimento em função da cobertura do solo, e os valores limites para mudança da fase esta situada entre 10 e 80% de CS. A duração de dias até o final da primeira fase (10% CS) foi aproximadamente 28 DAS para as densidades 1, 2 e 3 e para a D4 a duração foi em média de 31 dias. Esse período, para as épocas de semeadura, foi inferior para a E4 (27 DAS) e de aproximadamente 30 DAS para as semeaduras realizada nas épocas 1, 2 e 3. A cobertura de 80% do solo ocorreu aos 50 DAS para as densidades D1 e D2 e aos 56 e 62 DAS aproximadamente para as densidades D3 e D4, na mesma ordem. A E2 apresentou o maior período (61 DAS) para a cultura atingir 80% de CS, enquanto que a E1 atingiu aos 50 DAS.

Após a CS máxima, ocorreu uma queda acentuada em todas as épocas de semeadura (Figura 31). Na E1, a D3 (83 DAS) apresentou um declínio maior que a D4, que antes apresentava a CS menor. Na E2, as densidades D1 e D2 ficaram inferiores a D3. De maneira geral, as densidades estudadas apresentaram o mesmo comportamento, as densidades D1 e D2 obtiveram os maiores valores de cobertura do solo, enquanto que as densidades D3 e D4 apresentaram os menores CS, porem a D3 foi superior a D4 em todas as épocas.

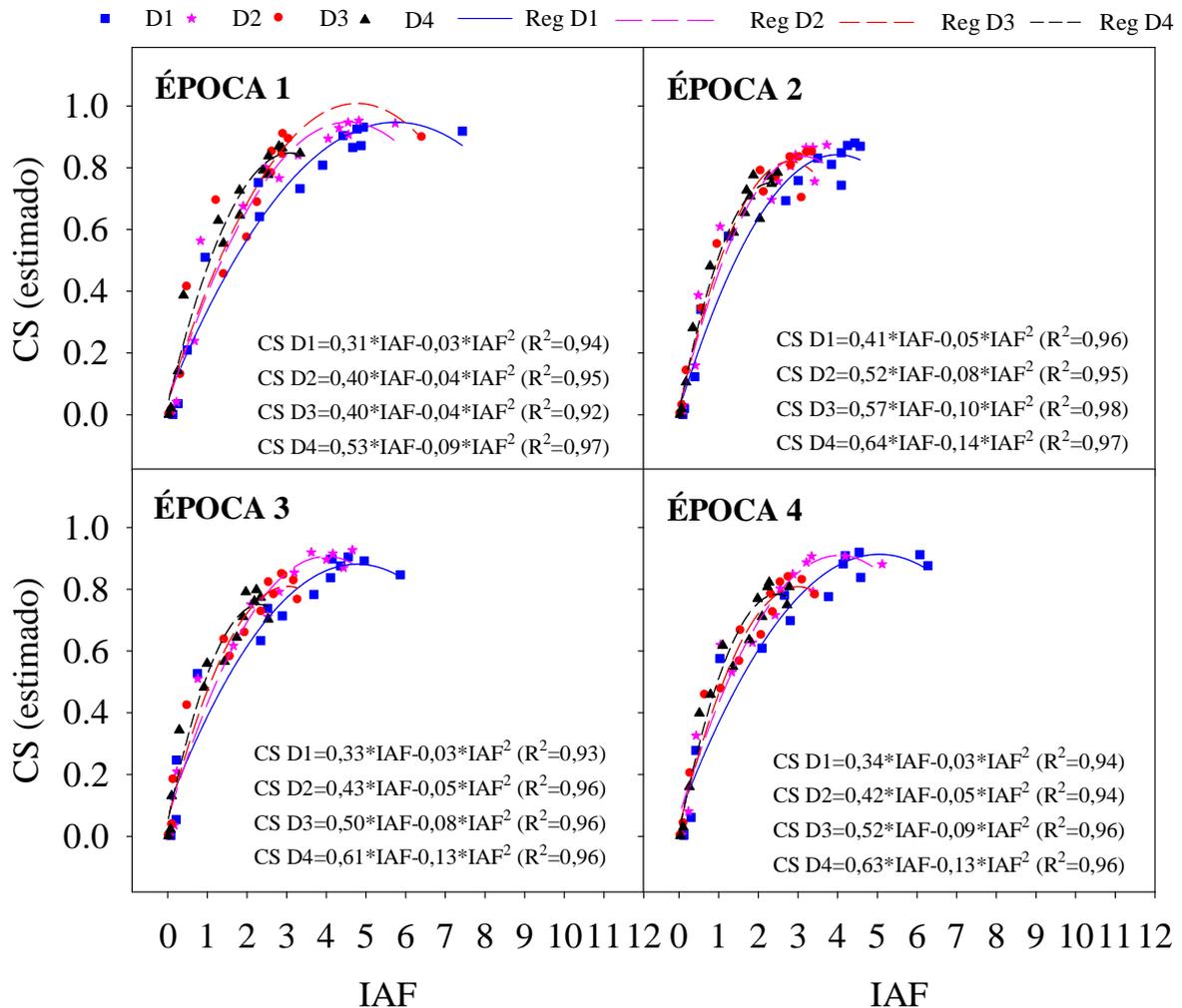
Figura 31. Estimativa da cobertura do solo (CS) e índice de área foliar estimado (IAF), no decorrer de dias após a semeadura (DAS) para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2014) e densidades (D1, 125000 pl ha⁻¹), (D2, 87500 pl ha⁻¹), (D3, 50000 pl ha⁻¹) e (D4, 37500 pl ha⁻¹) do milho.



Fonte: Autor (2015)

O modelo polinomial de segundo grau estimou a cobertura do solo através da variável independente (IAF) e obteve coeficientes de determinação superior a 0,90 (Figura 32). De acordo com o modelo utilizado para estimativa de CS, a planta precisava obter no mínimo o índice de área foliar de 2,5 para atingir 80% da cobertura do solo. Desse modo a equação serve como ferramenta para estimar a CS através do IAF e definir as fases de crescimento para a cultura do milho, em conformidade a Allen et al., (1998).

Figura 32. Relação entre a cobertura do solo (CS) e o índice de área foliar (IAF), para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha⁻¹), (D2, 87500 pl ha⁻¹), (D3, 50000 pl ha⁻¹) e (D4, 37500 pl ha⁻¹) do milho.



Fonte: Autor (2015)

Notas:^{ns} não significativo, ($p < 0,05$), pelo teste t;

*significativo, ($p < 0,05$), pelo teste t;

Reg: Regressão quadrática

O índice de área foliar máximo pelo ajuste (5,3; 4,4; 3,4; e 2,6) seguiu uma relação direta com o aumento da densidade (1 a 4), conforme é detalhado na Figura 31. Este aspecto reflete uma cobertura de até cinco vezes mais o que seria necessário para obter a área suficiente para cobrir totalmente o solo, entretanto nenhum tratamento apresentou a cobertura de 100% do solo. O tratamento que mais cobriu o solo foi a D2 na E1 (95%), enquanto que a D4 da E2 atingiu apenas 78% da CS. Isso ocorreu devido à distribuição das folhas, em que uma sobrepõe a outra e impede que elas fiquem bastante distribuídas sobre o solo. A hipótese apresentada a respeito do cultivo mais adensado proporciona maior cobertura do solo na

entrelinha das plantas é devido uma modificação na distribuição das folhas por causa da competição por radiação.

De acordo com os resultados de NYAKUDYA & STROOSNIJDER, (2014) a comunidade de 30000 plantas por hectare atingiram a cobertura máxima do solo aos 63 dias após a semeadura, com porcentagem máxima de 60%.

4.9 Variáveis de produção

As variáveis de produção do milho (comprimento de espiga - CE, massa de mil grãos - M1000, número de fileira de grãos - NFG e rendimento de grãos - RG) em função das épocas de semeadura não apresentaram diferença significativa, ($p < 0,05$), pelo teste F, enquanto que a massa de espiga despilhada (MED), número de grãos por fileira (NGF), número de espiga por planta (NEP) e massa de grão por espiga (MGE) apresentaram diferença significativa, ($p < 0,05$), pelo teste F. Não houve diferença significativa, a 5%, na interação entre épocas x densidades para as variáveis de produção, indicando que os valores das variáveis de produção de épocas de semeadura independem das densidades de plantas. Todos os resultados de densidades de plantas foram significativos, ($p < 0,05$), pelo teste F, para regressão linear e apenas MED, MGE e M1000 apresentaram diferença significativa para a regressão quadrática, indicando que a equação polinomial de segundo grau explica o comportamento dessas variáveis em função das densidades de semeadura, enquanto que as demais variáveis de produção apresentaram o comportamento linear, em função das densidades de plantas (Tabela 15).

A massa de espiga despilhada foi maior na E1 (224,3 g) e não houve diferença estatística para E2 (166,6 g) e E3 (206,3 g), mas diferiu da E4 (202,3 g), porém a E3 não diferiu da E4, a massa de grãos por espiga apresentou o mesmo comportamento entre as épocas (Tabela 16). O número de espiga por planta foi superior na E2 (0,89), mas não diferiu estatisticamente da E3 (0,86) e da E1 (0,81), mas diferiu da E4 (0,74), porém a E4 não diferiu da E1 e da E3. A E3 obteve maior número de grãos por fileira (32,7), mas não diferiu da E1 e da E2, mas apresentou diferença estatística, pelo teste Tukey, ($p < 0,05$), para E4, porém a E4 não diferiu da E1 e da E2.

Tabela 15- Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de épocas de semeadura e densidades de semeadura das variáveis de produção: comprimento de espiga (CE), diâmetro de espiga (DE), massa de espiga despalhada (MED), massa de grão por espiga (MGE), massa de mil grãos (M1000), número de espiga por planta (NEP), número de fileira de grãos, número de grãos por fileira (NGF) e rendimento de grãos (RG).

FV ¹	GL ²	CE	DE	MED	MGE	M1000	NEP	NFG	NGF	RG
		Quadrados Médios								
Blocos	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Épocas	3	3,43 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1928,29*	860,52*	3328,69 ^{ns}	0,07*	1,28 ^{ns}	17,78*	1550444,50 ^{ns}
Resíduo (a)	9	2,37	0,02	304,10	207,20	1420,00	0,01	0,96	3,12	699213,88
Densidades	(3)	107,68*	1,30*	62925,23*	34333,64*	18009,97*	0,47*	4,83*	406,37*	5401316,36*
Regressão Linear	1	322,10*	3,87*	186553,97*	101763,63*	47850,71*	1,40*	12,9*	1217,30*	11485231,31*
Regressão Quadrática	1	0,95 ^{ns}	0,001 ^{ns}	1972,64*	1097,03*	4846,96*	0,01 ^{ns}	0,39 ^{ns}	1,11 ^{ns}	1633298,27 ^{ns}
Regressão Cúbica	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Densidades X Épocas	9	0,57 ^{ns}	0,036 ^{ns}	266,57 ^{ns}	125,52 ^{ns}	610,14 ^{ns}	0,01 ^{ns}	1,61 ^{ns}	3,14 ^{ns}	642168,22 ^{ns}
Resíduo (b)	36	0,88	0,022	454,26	258,89	1144,66	0,02	0,87	3,02	445815,74
Total	63									
CV a (%)		9,90	2,86	8,16	8,83	10,04	14,38	6,84	5,64	15,57
CV b (%)		6,03	3,12	9,97	9,87	9,01	16,94	6,51	5,55	12,43
Média geral		15,53	4,84	213,68	163,00	375,30	0,83	14,32	31,31	5371,37

Fonte: Autor (2015)

Notas: ^{ns}Não significativo a p<0,05 pelo teste F;

*Significativo a p<0,05 pelo teste F;

¹Fonte de variação;

²Graus de liberdade.

Tabela 16- Efeito de épocas de semeadura nas variáveis de produção do milho: comprimento de espiga (CE), diâmetro de espiga (cm), massa de espiga despalhada (MED), massa de grãos por espiga (g), massa de mil grãos (g), número de espiga por planta (NEP), número de fileira de grãos (NFG), número de grãos por fileira (NGF) e rendimento de grãos (RG) de milho (*Zea mays L.*). Rio Largo-AL, 2013.

Tratamentos	CE (cm)	DE (cm)	MED (g)	MGE (g)	M1000	NEP	NFG	NGF	RG (Mg ha ⁻¹)
ÉPOCA 1	15,9a	4,8a	224,3b	171,1b	385,0a	0,81ab	14,5a	31,5ab	5,29a
ÉPOCA 2	15,4a	4,9a	221,7b	166,6b	390,2a	0,89b	14,3a	30,9ab	5,74a
ÉPOCA 3	15,8a	4,8a	206,3ab	159,8a	365,1a	0,86ab	13,9a	32,7b	5,46a
ÉPOCA 4	14,9a	4,8a	202,3a	154,5a	360,9a	0,74a	14,5a	30,2a	5,00a

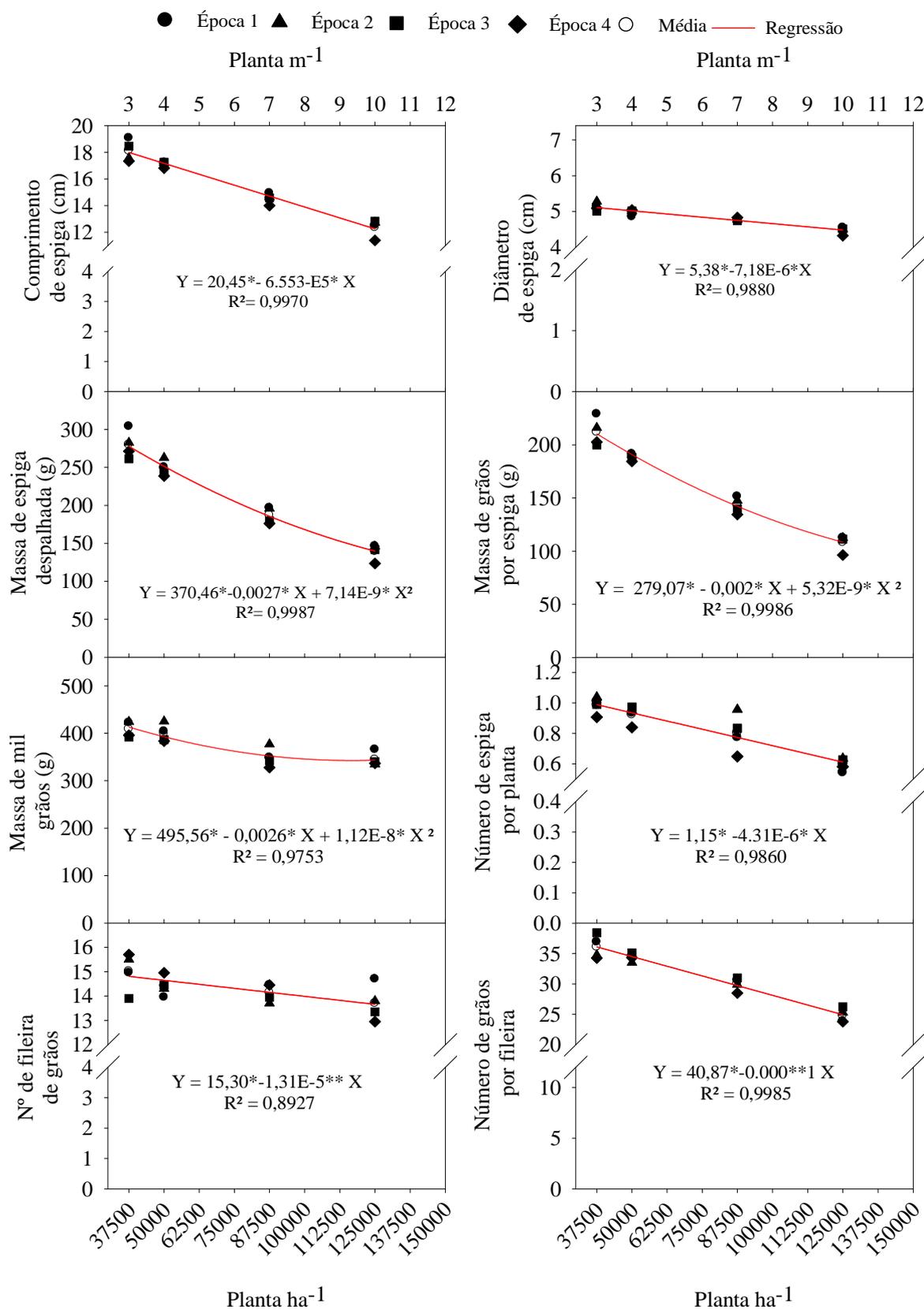
Fonte: Autor (2015)

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

De acordo com os resultados das variáveis de produção, em função das épocas de semeadura, houve pouca variação entre elas, porém a E2 apresentou valores mais elevados para as variáveis estudadas, o que pode ser atribuído a melhor qualidade da época devido a maior quantidade de energia disponível (2144,6 MJ m⁻²) e a grande quantidade de unidades térmicas acumulada (1638 GD) no decorrer da época.

O ajuste linear para as variáveis de produção: CE, DE, NEP e NGF, em função da densidade de plantas apresentaram coeficiente de determinação acima de 0,98 (Figura 33). Entretanto, a regressão linear foi negativa, demonstrando que o CE, DE, NEP, NFG e NGF foi menor quando submetido a altas densidades de plantas (125000 plantas ha⁻¹), ou seja, o aumento da densidade provocou uma queda na reta. A equação ajustada mostra que a cada 1 planta por hectare adicionada, espera-se uma redução média das variáveis CE, DE, NEP, NFG e NGF, igual ao coeficiente angular da reta. As variáveis de produção (MED, MEG e M100), apresentaram melhor ajuste quadrático, de acordo com teste F (p<0,05). Os valores do coeficiente de determinação (0,99; 0,99 e 0,97) indicam que a regressão quadrática negativa é o modelo apropriado para explicar essas variáveis em função da densidade de plantas. Sangoi et al., (2001a) encontraram resultados semelhantes, e afirmaram que altas densidades provoca queda de produção por espiga, mas aumenta a produtividade de área. Dourado Neto et al., (2003) confirmam esses resultados e afirmam que com o aumento na população de plantas houve redução no tamanho das espigas e no índice de espiga por planta, entretanto houve compensação na produção, pelo número de plantas por área. O aumento de população também provocou a diminuição do número de grãos por fileira e o número de fileira de grãos.

Figura 33. Regressão para as variáveis de produção, em função das densidades de semeadura do milho.



Fonte: Autor (2015)

Notas: * significativo, ($p < 0,05$), pelo teste t.

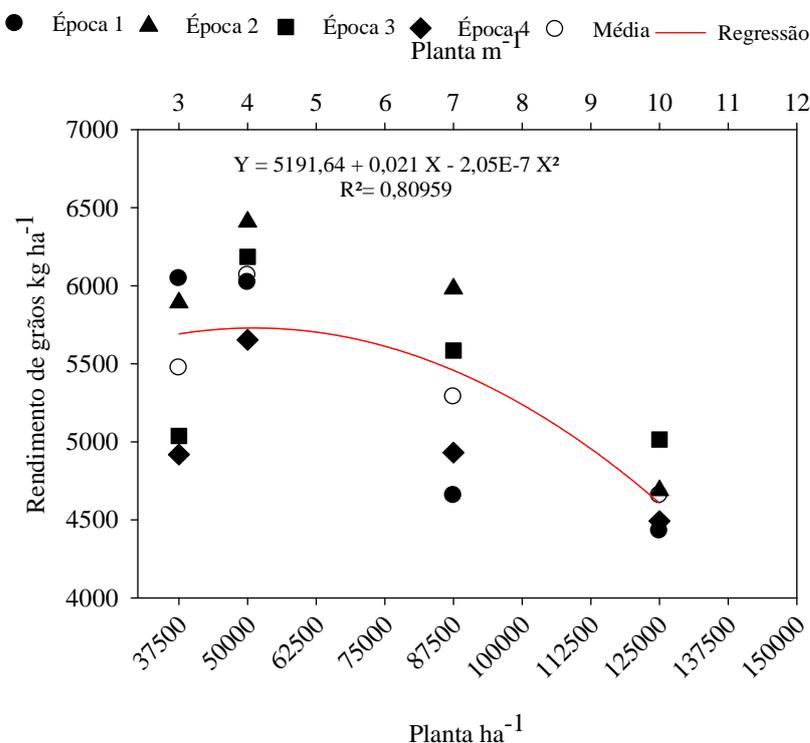
Farinelli; Penariol e Fornasieri Filho (2012) pesquisando sobre densidade populacional de milho também observou decréscimo no número de grãos por espiga, número de fileira de grãos, número de grãos por fileira e a massa de cem grãos, em função do aumento da densidade. Entretanto, Takasu et al. (2013) encontraram resultados praticamente constante para a massa de cem grãos, com o aumento da densidade de plantas.

Kappes et al. (2010) em pesquisa realizada em Selvíria (MS), com 5 híbridos, 2 espaçamento entrelinhas de plantio e 5 densidade populacional de plantas, registraram uma diminuição linear para as variáveis de produção, comprimento e diâmetro de espiga, prolificidade e massa de cem grãos, a medida que se aumentou a população de plantas. Resultados similares foi encontrado por outros pesquisadores (BRATCHVOGEL et al., 2009; SILVA et al., 2014), uma redução acentuada no comprimento e diâmetro de espiga, em função do aumento populacional de plantas. SILVA et al. (2014) mostraram uma diferença de aproximadamente 25% no número de grãos por fileira entre híbridos, quando houve o aumento da população de 40 para 80 mil plantas hectare e uma redução de 5% para massa de cem grãos. O aumento da população provoca maior competição intraespecífica pelos recursos naturais, que prejudica na manutenção das demais estruturas do vegetal, principalmente o desenvolvimento da espiga (KAPPES et al., 2011).

O rendimento máximo de grãos ($6409,2 \text{ kg ha}^{-1}$) foi obtido pela D3 (50.000 plantas ha^{-1}) na E2, a D3 apresentou média de $6067,3 \text{ kg ha}^{-1}$, enquanto que D1 (125.000 plantas ha^{-1}) registrou o menor valor de RG ($4656,5 \text{ kg ha}^{-1}$). A regressão quadrática subestimou o rendimento máximo de grãos observado em aproximadamente 23% ($4653,4 \text{ kg ha}^{-1}$) obtido pela densidade de 51.220 plantas por hectares (Figura 34).

Apesar de que a D1 apresentou a maior eficiência no uso da radiação foi observado o menor rendimento de grãos, isso pode ser explicado pelo fato que a característica foliar da variedade é mais aberta e que altas densidades populacional de plantas podem ter acentuado o sombreamento nos níveis mais baixos do dossel, em que essas folhas possuem atividade metabólica baixa e, com isso não contribuem para o crescimento da cultura (CHARLES-EDWARDS et al., 1986; ARGENTA et al., 2001; KUNZ et al., 2007;). De acordo com Silva et al. (1999), a recomendação para otimizar a produção de milho varia entre 30000 e 70000 pl ha^{-1} .

Figura 34. Regressão quadrática para rendimento de grãos, em função das densidades de semeadura do milho.



Fonte: Autor (2015)

Silva et al. (2014) encontraram resultados semelhantes e recomendaram a densidade de 60 mil plantas por hectare, já que o resultado não diferiu da população de 80 mil plantas por hectare. Sangoi et al. (2005), trabalhando com híbrido simples e duplo encontraram um aumento quadrático para rendimento de grãos com incremento populacional de 25 para 125 mil pl ha⁻¹, porém o rendimento ótimo foi alcançado por uma população de 103.132 e 110.162 pl ha⁻¹. Conforme os autores, a ótima resposta ao adensamento é devido, o bom nível de fertilidade do solo associada a distribuição pluviométrica regular na fase reprodutiva da cultura.

Diversas pesquisas (SANGOI et al., 2002a; MARCHÃO; BRASIL; XIMENES, 2006; SANGOI et al., 2011; TAKASU et al., 2013) mostraram incremento no rendimento de grãos em função do aumento da densidade de plantas de milho, porém maior ganho ocorreu em genótipos com arquitetura foliar mais ereta por serem mais eficiente em captar energia solar e mais competitiva em altas densidades. Outros autores afirmam que híbridos de milho respondem melhor a altas densidades, devido ao porte e a características de folhas mais eretas acima da inserção da espiga (SANGOI et al., 2002a; SANGOI et al., 2002b; TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004; PENARIOL; FORNASIERI FILHO, (2012). Dourado Neto et al.,

(2003) realizaram um trabalho e observaram o efeito do arranjo espacial de plantas de milho sobre o rendimento e concluiu, que o rendimento de grãos até 60.000 pl ha⁻¹, independentemente do genótipo, é crescente.

A maior relação do rendimento de grãos e biomassa acumulada foi observada pela D4 (0,46) e foi 56% maior que a D1 que apresentou o menor índice de colheita (0,20), a média do índice de colheita da pesquisa foi 0,33, indicando que em relação a biomassa total produzida, 33% foi peso de grãos (Tabela 17). De acordo com os resultados deste experimento foi visto que, quando aumentou a densidade de plantas o acúmulo de biomassa aumentou significativamente, entretanto o rendimento de grãos diminuiu devido ao auto-sombreamento das folhas e a baixa capacidade de translocar os fotoassimilados para o enchimento dos grãos. O índice de colheita foi superior na E2 (0,36), devido à maior quantidade de radiação disponível na época associada a um grande acúmulo de unidades térmicas no decorrer do cultivo.

Tabela 17- Índice de colheita, para épocas (E1 28/06/2013, E2 08/07/2013, E3 18/07/2013 e E4 29/07/2013) e densidades (D1, 125000 pl ha⁻¹), (D2, 87500 pl ha⁻¹), (D3, 50000 pl ha⁻¹) e (D4, 37500 pl ha⁻¹) do milho.

ÉPOCA/ DENSIDADES	ÍNDICE DE COLHEITA				Média
	D1	D2	D3	D4	
E1	0,20	0,19	0,41	0,47	0,32
E2	0,23	0,30	0,39	0,52	0,36
E3	0,20	0,25	0,37	0,43	0,31
E4	0,18	0,23	0,43	0,43	0,32
Média	0,20	0,24	0,40	0,46	0,33

Fonte: Autor (2015)

Corroborando com os resultados encontrados nesta pesquisa, Yang et al. (2004) observaram valores de índice de colheita decrescente em função do aumento populacional de plantas, os valores variaram de 0,49 (113.000 plantas ha⁻¹) a 0,53 (70.000 plantas ha⁻¹) em um experimento em 1999, dados de outro experimento em 2000, os valores variaram de 0,50 (110.000 plantas ha⁻¹) a 0,54 (69.000 plantas ha⁻¹). Argenta et al. (2001a) encontraram valores diferentes em seu trabalho em que o índice de colheita não foi afetado pela densidade de plantas. De acordo com os autores para uma população de 50 mil plantas ha⁻¹, o índice de colheita variou entre 0,42 e 0,50. Demétrio et al., (2008) encontraram valor máximo de 44% para a população de 58 mil plantas por hectare.

5 CONCLUSÕES

A região dos tabuleiros costeiros de Alagoas apresenta condições favoráveis de temperatura e umidade relativa do ar, para o cultivo do milho, entretanto, cultivo tardio com temperatura elevada provocou redução no ciclo de produção. O semeio em 28 de julho de 2013 (E4) apresentou a menor exigência de graus-dia durante o ciclo, enquanto na época 2 (08/07/2013) apresentou a maior exigência térmica para mudança de estágio fenológico. Em todas as épocas estudadas foi observada a irregularidade sazonal da precipitação pluvial, sendo necessária a adoção de irrigação para manter o conteúdo de água do solo acima da água facilmente disponível.

As maiores densidades de plantas (D1 e D2) apresentaram aumento no IAF e biomassa seca e redução para diâmetro do colmo. Os modelos de crescimento (logístico, log-normal e de Boltzmann) apresentaram elevados coeficientes de determinação e as plantas atingiram o máximo das variáveis de crescimento entre R1 e R3.

A evapotranspiração potencial foi maior na época semeada em 08 de julho de 2013. De forma geral, a densidade 2 (87500 plantas ha⁻¹) apresentou a maior demanda hídrica. A evaporação foi maior na densidade 4 (37.500 plantas ha⁻¹), enquanto a transpiração foi maior para os cultivos mais adensados (D1 e D2). O armazenamento de água no solo e a exigência hídrica da cultura variaram com as densidades de plantas. As eficiências no uso da água para produção de biomassa (EUA) e para rendimento de grãos (EUAg) ajustaram-se linearmente em função da densidade de plantas, porém, a biomassa e EUA aumentam proporcionalmente com o aumento da densidade de plantas enquanto o rendimento de grãos e EUAg diminuíram com a maior densidade de plantas.

A irradiância solar transmitida diminuiu com o aumento do índice de área foliar e o coeficiente de extinção de luz foi menor para a população de 125.000 plantas ha⁻¹(D1) e maior para a população de 37.500 plantas ha⁻¹(D4), ambas com espaçamento de 0,8m entrelinhas. A densidade de 87.500 plantas ha⁻¹(D2) apresentou a maior cobertura do solo, enquanto que a densidade de 37.500 plantas ha⁻¹(D4) a menor cobertura. A eficiência no uso da radiação tanto para produção de biomassa quanto para rendimento de grãos mostraram a mesma variação da eficiência no uso da água.

As variáveis de produção: comprimento de espiga, diâmetro de espiga, número de espiga por planta, número de fileira de grãos e número de grãos por fileira ajustaram-se linearmente em função das densidades de plantas, enquanto que massa de espiga despilhada, massa de grãos por espiga tiveram ajuste quadrático, entretanto ambas com efeito negativo. A

variedade AL bandeirante teve o máximo rendimento de grãos na densidade de 50.000 plantas por ha⁻¹, enquanto que o cultivo mais denso (125.000 plantas por ha⁻¹) proporcionou redução no rendimento da cultura. A época 2 apresentou o maior rendimento de grãos, enquanto que a época 4 menor. A densidade de 37.500 plantas por ha⁻¹ (D4) mostrou a maior relação de grãos/biomassa, enquanto que a densidade de 125.000 plantas por ha⁻¹ obteve a menor relação.

REFERÊNCIAS

- ADMS, J. E.; ARKIN, G. F. A light interception method for measuring row crop ground cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.1, p.789-792, 1977.
- ALLEN, R.G. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.
- _____, R.G. et al. Updated reference evapotranspiration definition and calculation procedures. Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements, 36 p., 1993.
- _____, R. G. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome**, v. 300, p. 6541, 1998.
- ALMEIDA, M.L. et al. Incremento na densidade de plantas: uma alternativa para aumentar o rendimento de grãos de milho em regiões de curta estação estival de crescimento. **Ciência Rural**, Santa Maria, Porto Alegre, RS, v. 30, n. 1, p. 23-29, 2000.
- ALVAREZ, C. G. D.; VON PINHO, R. G.; BORGES, I. D. Avaliação de características agronômicas e de produção de forragem e grãos de milho em diferentes densidades de semeadura e espaçamentos entre linhas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.30, n.3, p.402-408, 2006.
- ALVES, W. M. et al. de milho em função da umidade de colheita e da temperatura de secagem1. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 3, p. 469-474, 2001.
- AMARAL FILHO, J. P. R. et al. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 467-473, 2005.
- ANDERSSON, I.; BACKLUND, A. Structure and function of Rubisco. *Plant Physiology and Biochemistry*, v.46, p.275-291, 2008.
- ANDRADE, F. H.; UHART, S. A.; CIRILO, A. Temperature affects radiation use efficiency in maize. **Field Crops Research**, v. 32, n. 1, p. 17-25, 1993.
- ARAÚJO, E.F et al. Maturação de sementes de milho- doce ó Grupo super doce . **Revista Brasileira de Sementes**, v.28, n.2, p.69-76, 2006.
- ARGENTA, G. et al. Resposta de híbridos simples de milho à redução do espaçamento entre linhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.71-78, 2001a.
- _____, G.; SILVA, P. R F. da; SANGOI, L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado-da-arte. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 1075-1084, 2001b.
- ARMBRUST, D. V. Rapid measurement of crop canopy cover, **Agronomy Journal**, vol. 82, n. 6, p. 1170- 1171 (1990).

ARSOY, S.; OZGUR, M.; KESKIN, E.; YILMAZ, C. Enhancing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils. **Geoderma**, v. 195, p. 133-144, 2013.

BARBIERI, P. A. et al. Row spacing effects at different levels of nitrogen availability in maize. **Agronomy Journal** 92, 283-288, 2000.

BARBIERI, P. et al. Maize evapotranspiration and water-use efficiency in response to row spacing. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 4, p. 939-944, 2012.

BATISTA, E. L. DA S. et al. Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, UAEEA/UEG, v.17, n.10, p.108061087, 2013.

BEADLE, C.L. Growth analysis. In: HALL, D.O., SCURLOCK, J.M.O., BOLHÀR-NORDENKAMPF, H.R. et al. **Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual**. London : Chapman & Hall, 1993. p. 36-46.

BENINCASA, M. M. P. Análise de crescimento de plantas: noções básicas. Funep, 1988.

BERGAMASCHI, H. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p.243-249, 2006.

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

BISOGNIN, D. A. et al. Potencial de variedades de polinização aberta de milho em condições adversas de ambiente. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 3, n. 1, p. 29-34, 1997.

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?. **Crop and Pasture Science**, v. 56, n. 11, p. 1159-1168, 2005.

BONHOMME, R. et al. Relations entre production de matière sèche aérienne et énergie intercptée chez différents génotypes de maïs. **C. R. Académie Sciences**, Série III, Paris, n. 294, p. 393-397. 1982.

BORBA, C.S. et al. fisiológica de sementes do híbrido simples BR 201 de milho (*Zea mays L.*). **Revista Brasileira de Sementes**, v.16, n.1, p.63-67, 1994.

BORRÁS, L.; MADDONNI, G .A.; OTEGUI, M.E. Leaf senescence in maize hybrids: plant population, row spacing and kernel set effects. **Field Crops Research**, v. 82, p.13-26, 2003.

BRACHTVOGEL, E.L. et al. Densidades populacionais de milho em arranjos espaciais convencional e equidistante entre plantas. **Ciência Rural**, v.39, p.2334-2339, 2009.

BRUNINI, O. et al. Características macroclimáticas, agrometeorológicas e restrições ambientais para o cultivo de milho em regiões tropicais baixas. **Infobibos, Campinas**, v. 1, 2006.

BULLOCK, D.G.; NIELSEN, R.L.; NYQUIST, W.E. A growth analysis comparison of corn grown in conventional and equidistant plant spacing. **Crop Science**. Madison, v. 28, n. 2, p. 254-258, 1988.

CARVALHO, M.A.C et al. Produtividade do milho em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 47-53, 2004.

CARVALHO, H.W.L et al. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de milho no Nordeste brasileiro no triênio 1998 a 2000. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 11, p. 1581-1588, 2002.

CRUZ, J. C. et al. **Produtividade de Variedades de Milho em Sistema Orgânico de Produção**. Dezembro, 2009, 6p. (Comunicado Técnico, Sete Lagoas, MG, n 171).

CHARLES-EDWARDS, D. A.; DOLEY, D.; RIMMINGTON, G. M. Modelling plant growth and development, 1986.

CIRILO, A. G.; ANDRADE, F. H. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. **Crop science**, v. 34, n. 4, p. 1039-1043, 1994.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2014. [http// www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). 30/12/2014.

DEMÉTRIO, C. S. et al. Desempenho de híbridos de milho submetidos a diferentes espaçamentos e densidades populacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, p.1.691-1.697, 2008.

DETOMINI, E.R. et al. Coeficiente de Extinção de Luz para o Híbrido Dkb 390 em dois Níveis de Suprimento de Nitrogênio. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 2, p. 155-162, 2008.

DIDONET, A. D. et al. Efeito da radiação solar e temperatura na definição do número de grãos em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 933-938, 2002.

DOLMAN, A. J. A multiple-source land surface energy balance model for use in general circulation models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 65, n. 1, p. 21-45, 1993.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1979. 193p.

DOURADO NETO, D. et al. Efeito da população de plantas e do espaçamento sobre a produtividade de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 03, 2003.

EARL, H.J.; DAVIS, R.F. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. **Agronomy Journal**, v.95, p.688-696, 2003.

EVETT, S.R. Soil water measurement by time domain reflectometry. **Encyclopedia of Water Science**, Marcel Dekker, Inc. New York, p.894-898, 2003.

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

FAGAN, E. B. et al. Lei de Beer e sua relação com a ecofisiologia de plantas. **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**. ISSN, v. 2178, p. 7662, 2013.

FARAHANI, H. J.; BAUSCH, W. C. Performance of evapotranspiration models for maize bare soil to closed canopy. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n. 4, p. 1049-1059, 1995.

FARINELLI, R.; PENARIOL, F. G.; FORNASIERI FILHO, D. Características agronômicas e produtividade de cultivares de milho em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades populacionais. **Científica**, v. 40, n. 1, p. 21-27, 2012.

FERREIRA JUNIOR, R. A. et al. Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.1229-1236, 2012.

_____, RICARDO ARAUJO. **Crescimento, eficiência no uso da radiação e energia de biomassa em cana-de-açúcar irrigada**. 2013. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA.

_____, R. A. et al. R. A. Eficiência do uso da radiação em cultivos de milho em Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 322-328, 2014a.

_____, R. A. et al. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.798-804, 2014b.

FIESP ó Federação das Industrias do Estado de São Paulo. Informativo de agro safra mundial de milho 2014/2015: 8º levantamento do USDA. São Paulo: Fiesp. 1p. Disponível em: http://az545403.vo.msecnd.net/uploads/2014/12/boletim_safra-undialilho_dezembro2014.pdf, 2014.

FISCHER,G; G. et al. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century. 2001.

FLÉNET, F. et al. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 2, p. 185-190, 1996.

FRANKE, A. E.; DORFMAN, R. Viabilidade econômica da irrigação, sob condições de risco, em regiões de clima subtropical. I. Cultura do milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 33, n. 12, p. 2003-2013, 1998.

FREITAS, L. F; et al. 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.

FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p 59-66, 1999.

FRANCIS, C.A.; RUTGER, J.N.; PALMER, A.F.E. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L.). **Crop Science**, 9:537-539,1969.

GALLAGHER, J. N.; BISCOE, P. V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **Journal of Agricultural Science**. New York, v. 91, n. 1, p. 47-60, 1978.

GARDNER, F.P.; PEARCE, R.B.; MITCHELL, R.L. **Physiology of crop plants**. Ames: Iowa State University, 1985. 327p.

GARDIOL, J.M.; SERIO, L.A.; DELLA MAGGIORA, A. I. Modelling evapotranspiration of corn (*Zea mays*) under different plant densities. **Journal of Hydrology**, v. 271, n. 1, p. 188-196, 2003.

GOSSE, G. et al. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, v. 6, n. 1, p. 47-56, 1986.

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.

GROSS, M. R.; VON PINHO, R. G.; BRITO, A. H. Adubação nitrogenada, densidade de semeadura e espaçamentos entre fileiras na cultura do milho em sistema de plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.30, p.387-393, 2006.

HAMMER, G. L et al. Future contributions of crop modelling from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1, p. 15-31, 2002.

HANSEN, J. W. Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. **Agricultural Systems**, v. 74, n. 3, p. 309-330, 2002.

Hanway, J. J. Growth Stages of Corn (*Zea mays* L.). **Agronomy Journal**, v.45, p. 487-491. 1963.

HASHEMI-DEZFOULI, A.; HERBERT, S. J. Intensifying plant density response of corn with artificial shade. **Agronomy Journal**, v. 84, n. 4, p. 547-551, 1992.

HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; PRUEGER, J. H. Managing soils to achieve greater water use efficiency. **Agronomy journal**, v. 93, n. 2, p. 271-280, 2001.

HIPPS, L. E.; ASRAR, G.; KANEMASU, E. T. Assessing the interception of photosynthetically Active radiation in winter wheat*, **Agricultural and Meteorology**, 28 p. 253-259, 1983.

HIROSE, T. Development of the MonsiÓSaeki Theory on Canopy Structure and Function. **Annals of Botany**. Senday, v. 95, n. 3, p. 483- 494, 2005.

INSTRUMENTS, LICOR. Radiation measurement instruments: radiometers, PAR sensors, dataloggers, spectroradiometers, photometers. **Lincoln, 24p.(catálogo)**, 1991.

IQBAL, Muhammad. An introduction to solar radiation. Elsevier, 1983.

JENSEN, M.E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York: ASCE, 1973. 215p.

JOHNSON, G.A.; HOVERSTAD, T.R.; GREENWALD, R.E. Integrated weed management using narrow corn row spacing, herbicides, and cultivation. **Agronomy Journal**, v.90, p.40-46, 1998.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R.; DYKE, P. T. **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development**. Texas AandM University Press, 1986.

KANG, S.; SHI, W.; ZHANG, J. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. **Field crops research**, v. 67, n. 3, p. 207-214, 2000.

KAPPES, C et al. Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Bragantia**, v. 70, n. 2, p. 334-343, 2010.

_____, C; et al. Arranjo de plantas para diferentes híbridos de milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, p. 348-359, 2011.

KARADAVUT, U. et al. Comparative study on some non-linear growth models for describing leaf growth of maize. **International Journal of Agriculture & Biology**, v.12, p.227-230, 2010.

KASPERBAUER, M.J.; KARLEN, D.L. Plant spacing and reflected far-red light effects on phytochrome-regulated photosynthate allocation in corn seedlings. **Crop Science**, v.34, p.1564-1569, 1994.

KINIRY, J. R. et al. 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.

_____, J. R. Maize physics development American. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY. Modeling plant and soil systems. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1991. P. 55-71. (Agronomy Monographs, 31).

KRUG, C. A.; VIEGAS, G. P.; PAOLIERI, L. Híbridos comerciais de milho. **Bragantia**, v. 3, n. 11, p. 367-552, 1943.

KUNZ, J. H. et al. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, 2007.

KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 94, n. 1, p. 13-29, 1999.

LAÜER, J. Should I be planting corn at a 30-inch row spacing. **Wisconsin Crop Manager**, Madison, v. 1, n. 6, p. 6-8, 1994.

LAUER, J.G.; ROTH, G.W.; BERTRAM, M.G. Impact of defoliation on corn forage yield. **Agronomy Journal**, v.96, p.1459-1463, 2004.

LI, S. X. et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China. **Agricultural Water Management**, v. 116, p. 39-49, 2013.

LIETH, J. H.; REYNOLDS, J.F. A model of canopy irradiance in relation to changing leaf-area in a phytotron-grown snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop. **International Journal of Biometeorology**, v.28, n.1, p. 61-71, 1984.

LINDQUIST, J. L. et al. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 72- 78, 2005.

LOOMIS, R. S.; CONNORS, D. J. **Crop ecology**: productivity and management in agricultural systems. Cambridge: Cambridge University, 1992. 550p.

_____, R.S.; AMTHOR, J.S. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. **Crop Science**. Madison, v. 39, n. 6, p. 1584-1596, 1999.

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

LYRA, G. B. et al. Modelo de crescimento logístico e exponencial para o milho BR 106, em três épocas de plantio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.7, p.211-230, 2008.

_____, GUILHERME BASTOS et al. Modelo de crescimento logístico e exponencial para o milho BR 106, em três épocas de plantio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 7, n. 03, 2010.

_____, G. B. et al. Crescimento e produtividade do milho, submetido a doses de nitrogênio nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Ceres**, v. 61, p. 578-586, 2014.

MACHADO, E. C. et al. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 44, n. 1, p. 229-238, 1985.

MADDONNI, G. A.; OTIGUI, M. E.; CIRILO, A. G.; Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. **Field Crops Research** 71, p.183-193, 1993.

_____, G. A.; OTEGUI, M. E. Leaf area, light interception, and crop development in maize. **Field Crops Research**, v. 48, n. 1, p. 81-87, 1996.

MADDONNI, G. A.; OTEGUI, M. E.; CIRILO, A. G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. **Field Crops Research**, v. 71, n. 3, p. 183-193, 2001.

MAR, G. D. D. et al. Produção do milho safrinha em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Bragantia**, v. 62, n. 2, p. 267-274, 2003.

MARCHAO, R. L. Efeito da densidade de plantas sobre caracteres agronômicos de híbridos de milho, cultivados em espaçamento reduzido (2004). **Embrapa Cerrados-Teses/dissertações (ALICE)**, 2004.

_____, R. L.; BRASIL, E. M. **Cultivo do Milho Adensado: alternativa para maximizar o rendimento de grãos**. Embrapa Cerrados, 2007.

_____, R. L.; BRASIL, E.; XIMENES, P. A. Intercepção da radiação fotossinteticamente ativa e rendimento de grãos do milho adensado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, n. 02, 2006.

MARTINS, P.E.; COSTA, A.J.A. Comportamento de um milhohíbrido hiperprecoce em dois espaçamentos e diferentes populações de plantas. **Cultura Agrônômica**, v.12, p.77-88, 2003.

MARCOS FILHO, J. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. Fealq, 2005.

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

McCREE, K. J. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. **Agricultural and Meteorology**, 9, p. 191-219, 1972.

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

MEROTTO JUNIOR, A.; ALMEIDA, M. L. de; FUCHS, O. Aumento no rendimento de grãos de milho através do aumento da população de plantas. **Ciencia Rural. Santa Maria**. vol. 27, n. 4 (out./dez. 1997), p. 549-554, 1997.

MILANEZ, A. Y. et al. A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. **Revista do BNDES, Rio de Janeiro**, n. 41, p. 147-207, 2014.

MOCK, J. J.; PEARCE, R. B. An ideotype of maize. **Euphytica**, v. 24, n. 3, p. 613-623, 1975.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: **Symp. Soc. Exp. Biol.** 1965. p. 4.

_____, J. L. **Principles of Environmental Physics**. Edward Arnold, London, 291p., 1973.

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

_____, J. L. **Using tube solarimeters to measure radiation interception by crop canopies and to analyse stand growth**. Pub. Delta-T Devies, document code TSL ó AW-4-1, 1993, 11p.

MOKHTARPOUR, H. et al. Non-destructive estimation of maize leaf area, fresh weight, and dry weight using leaf length and leaf width. **Communications in Biometry and Crop Science**. Vol. 5, No. 1, pp. 19626, 2010.

MONSI, M.; SAEKI, T. The light factor in plant communities and its significance for drymatter production. **Japanese Journal of Botany**, Tokyo, v. 14, p. 22-52, 1953.

_____, M.; SAEKI, T. On the Factor Light in plant communities and its importance for matter production. **Annals of Botany**, London, v.95, p5496567, 2005.

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

MUCHOW, R. C.; DAVIS, R. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment II. Radiation interception and biomass accumulation. **Field Crops Research**, v. 18, n. 1, p. 17-30, 1988.

_____, R. C.; SINCLAIR, T. R.; BENNETT, Jackie M. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. **Agronomy journal**, v. 82, n. 2, p. 338-343, 1990.

MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H.; SILVA, M.I.G. Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca acumulada. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, 2005.

MUNDSTOCK, C. M. Milho: distribuição da distância entre linhas. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, n. 299, p. 28-29, 1977.

_____, C. M. Efeitos de espaçamentos entre linhas e de populações de plantas de milho (*Zea mays* L) de tipo precoce. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 13, n. 1, p. 13-17, 1978.

NORMAN, J. M.; CAMPBELL, G. S. Canopy structure. In: PEARCY, R. W.; HLERINGER, J.; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. (Eds.). **Plant physiological ecology: field methods and instrumentation**. London: Chapman and Hall, p. 301-326, 1989.

_____, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 77, n. 3, p. 263-293, 1995.

NYAKUDYA, I. W.; STROOSNIJDER, L.; Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop, **Agricultural Water Management** 146 2806296, 2014.

OTTMAN, M.J.; WELCH, L.F. Planting patterns and radiation interception, plant nutrient concentration, and yield in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 2, p. 167-174, 1989.

PEARCE, R. B.; BROWN, R. H.; BLASER, R. E. Photosynthesis in plant communities as influenced by leaf angle. **Crop Science**, v. 7, n. 4, p. 321-324, 1967.

PENARIOL, F. G. et al. Cultivares de milho semeadas em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades populacionais, na safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 02, 2003.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. IAC, 33p., (boletim técnico, 114), 1987.

PEREIRA, R. S. B. Caracteres correlacionados com a produção e suas alterações no melhoramento genético do milho (*Zea mays* L.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 26, n. 5, p. 745-751, 1991.

PIMENTEL, M.A.G; FONSECA, M.J.O.. Cultivo do milho. 7.ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de produção, 1). Disponível em: http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_7_ed/colsecagem.htm Acesso em: 25 fev. 2015.

RESENDE, S. G. de E; VON PINHO, R. G.; VASCONCELOS, R. C. de. Influência do espaçamento entre linhas e da densidade de plantio no desempenho de cultivares de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 03, 2010.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. How a corn plant develops. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 26p. (Special report, 48), 1993.

_____, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. Como a planta de milho se desenvolve. Piracicaba: **POTAFOS**, p.1-20. (Informações Agronômicas, 103), 2003.

ROCHA, A. E. Q., et al. Conteúdo de água no solo por reflectometria no domínio do tempo e balanço de água no solo em cultivo de milho. **Irriga**, v. 19, n. 2, p. 267, 2014.

ROSENBERG, Norman J. **Microclimate: the biological environment**. John Wiley & Sons, 1983.

SANGOI, L. Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. **Ciência Rural**, v. 31, n. 1, p. 159-168, 2001a.

_____, L., et al. Desempenho de híbridos de milho com ciclos contrastantes em função da desfolha e da população de plantas. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 271-276, 2001b.

_____, L. et al. Influence of row spacing reduction on maize grain yield in regions with a short summer. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 6, p. 861-869, 2001c.

_____, L. et al. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.79, p.39-51, 2002a.

_____, L. et al. Bases morfofisiológicas para maior tolerância dos híbridos modernos de milho a altas densidades de plantas. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 2, p. 101-110, 2002b.

_____, L. et al. Níveis de manejo na cultura do milho em dois ambientes contrastantes: análise técnico-econômica. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, 2003.

_____, L. et al. Rendimento de grãos, produção e distribuição de massa seca de híbridos de milho em função do aumento da densidade de plantas. **Revista brasileira Agrociência**, v. 11, n. 1, p.25-31, 2005.

_____, L.; SCHMITT, A.; ZANIN, C.G. Área foliar e rendimento de grãos de híbridos de milho em diferentes populações de planta. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.6, p.263-271, 2007.

_____, L. et al. Rendimento de grãos de híbridos de milho em duas densidades de plantas com e sem a retirada dos perfilhos. **Ciência Rural**, v.39, p.325-331, 2009.

_____, L. et al. Perfilhamento, área foliar e produtividade do milho sob diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 6, p. 609-616, 2011.

SAWAZAKI, E. et al. (Ed.). **Tecnologias de produção do milho**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2004. p. 55-84.

SCAPIM, C. A.; CARVALHO, C. G. P. de; CRUZ, C. D. Uma proposta de classificação dos coeficientes de variação para a cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 30, n. 5, p. 683-686, maio 1995.

SEPASKHAH, A. R.; FAHANDEZH-SAAD, S.; ZAND-PARSA, S. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management. **Agricultural Water Management**, v.99, p.51-57, 2011.

SHAUN, N.M. Sementes de variedades de milho x pequenos agricultores brasileiros. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.14, n.165, p. 8- 12, 1990.

SHIBLES, R.M.; WEBER, C. R. Interception of solar radiation and dry matter production by various planting patterns. **Crop Science**. Madison, v. 6, n. 1, p. 55659, 1966.

SHUTTLEWORTH, W. J. A one-dimensional theoretical description of the vegetation-atmosphere interaction. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 10, n. 3, p. 273-302, 1976.

_____, W. J.; WALLACE, J. S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 111, n. 469, p. 839-855, 1985.

_____, W. J.; GURNEY, R. J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 116, n. 492, p. 497-519, 1990.

SILVA, P.R.F. et al. Resposta de híbridos de milho à densidade de plantas, em três épocas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.4, p.585-595, 1999.

SILVA, E. C.; BUZETTI, S.; LAZARINI, E. Aspectos econômicos da adubação nitrogenada na cultura do milho em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.4, n.3, p.286-297, 2005.

SILVA, A. F. D. et al. Produtividade de híbridos de milho em função do espaçamento e da população de plantas em sistema de plantio convencional. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 2, p. 162-173, 2014.

SINCLAIR, T. R.; TANNER, C. B.; BENNETT, J. M. Water-use efficiency in crop production. **BioScience**, v. 34, n. 1, p. 36-40, 1984.

SOUZA, J. L. et al. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do tabuleiro costeiro de Maceió, AL, período de 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n.1, p.131-141, 2004.

_____, J. L.; NICÁCIO, R. M.; MOURA, M. A. L.. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, v. 30, n. 8, p. 1203-1220, 2005.

_____, J. L. et al. **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. Anaisí João Pessoa, agosto de 2006.

_____, J. L. et al. **Irradiância solar global e fotossintética em regiões de Alagoas**. 2011. In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Guarapari-ES, 2011.

SOUZA, R. C. et al. Growth of the crabgrass species *Digitaria ciliaris* and *Digitaria nuda*. **Planta Daninha**, v.30, p.317-325, 2012.

SOUZA, I.M. et al. **Comportamento de híbridos e variedades de milho em região semiárida no ano agrícola 2013**. In: VIII Congresso Nordestino de Produção Animal, Fortaleza-CE, 2013.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes: II. Seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 89, n. 3, p. 185-200, 1998.

STEWART, D.W. et al. Canopy structure, light interception and photosynthesis in maize. **Agronomy Journal**, v.95, p.1465-1474, 2003.

STRECK, N. A. et al. Temperatura base para aparecimento de folhas e filocrono da variedade de milho BRS Missões. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 224-227, 2009.

TAKASU, A. T. et al. Desempenho agrônômico do milho sob diferentes arranjos populacionais e espaçamento entrelinhas. **Agrarian**, v. 7, n. 23, p. 34-41, 2013.

TEODORO, I. **Avaliação da evapotranspiração e desenvolvimento da cultura do milho irrigado na região de Rio Largo - AL**. 2013. Dissertação de mestrado (mestrado em Meteorologia). UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS.

TETIO-KAGHO, F.; GARDNER, F. P. Responses of maize to plant population density. II. Reproductive development, yield, and yield adjustments. **Agronomy Journal**, v. 80, n. 6, p. 935-940, 1988.

TOHIDI, M. et al. Variables productivity of light interception in grain maize hybrids at various amount of nitrogen. **World Appl. Sci. J**, v. 16, n. 1, p. 86-93, 2012.

TOKATLIDIS, I. S.; KOUTROUBAS, S. D. A review of maize hybrids dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 103-114, 2004.

TOLLENAAR, M. Sink source relationships during reproductive development in maize. A Review. **Maydica**, 1977.

_____, M. IS LOW PLANT-DENSITY A STRESS IN MAIZE. **Maydica**, v. 37, n. 4, p. 305-311, 1992.

TOLK, J. A. et al. Aerodynamic characteristics of corn as determined by energy balance techniques. **Agronomy journal**, v. 87, n. 3, p. 464-473, 1995.

UCHIJIMA, Z. Maize and rice. **Vegetation and the Atmosphere**, v. 2, p. 33-64, 1976.

VAN BAVEL, C. H. M.; HILLEL, D. I. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. **Agricultural Meteorology**, v. 17, n. 6, p. 453-476, 1976.

VAN DEN HURK, B. J. J. M.; MCNAUGHTON, K. G. Implementation of near-field dispersion in a simple two-layer surface resistance model. **Journal of Hydrology**, v. 166, n. 3, p. 293-311, 1995.

VILA NOVA, N.A et al. **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.

WAGNER, M. V. et al. Avaliação do ciclo fenológico da cultura do milho em função da soma térmica em Guarapuava, Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 135-149, 2011.

_____, M. V. et al. da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em Guarapuava, PR, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 170-179, 2013.

WARRINGTON, I. J.; KANEMASU, E. T. Corn growth response to temperature and photoperiod I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. **Agronomy Journal**, v. 75, n. 5, p. 749-754, 1983.

WHITE, J. W. Modeling temperature response in wheat and maize. **El Batán, Mexico: CIMMYT-International Maize and Wheat Improvement Center**, p. 03-01, 2001.

YAN, W.; HUNT, L.A. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. **Annals of Botany**, v.84, p.607-614, 1999.

YANG, H. S. et al. Hybrid-maizeô a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. **Field Crops Research**, v. 87, n. 2, p. 131-154, 2004.

ZHANG, Y. et al. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 64, n. 2, p. 107-122, 2004.

ZHANG, S. et al. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management. **Field Crops Research**, v. 163, p. 55-63, 2014.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. **Agricultural Water Management**, v. 69, n. 2, p. 115-133, 2004.